



TITLE:

固定床領域を有する河川における
掃流砂・河床変動特性と河川生態
システム改善に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

久加, 朋子

CITATION:

久加, 朋子. 固定床領域を有する河川における掃流砂・河床変動特性と
河川生態システム改善に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-11-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18652>

RIGHT:

許諾条件により本文は2015/11/01に公開

固定床領域を有する河川における掃流砂・
河床変動特性と河川生態システム改善に関する研究

2014 年

久 加 朋 子

目 次

第1章 序 論

1.1.	研究背景と目的	1
1.2.	研究の構成	6

第2章 中小河川の概要と従来の研究

2.1.	中小河川の概要	11
2.1.1.	固定床領域を有する中小河川	11
2.1.2.	中小河川の河道計画	15
2.1.3.	結語	17
2.2.	固定床河川における既往の環境修復事例と課題	18
2.2.1.	環境修復に関する従来の研究と課題	18
2.2.2.	土砂水理学的知見に基づく固定床河川の環境修復に関する研究	19
2.2.3.	結 語	20
2.3.	固定床領域を有する場の掃流砂・河床変動特性と数値解析法	
2.3.1.	掃流砂量式	21
2.3.2.	固定床領域を有する場における数値解析法と河床変動特性	25
2.3.3.	結語	30
2.4.	水制に関する土砂水理学的知見	
2.4.1.	水制に関する研究の概要	33
2.4.2.	水制近傍の流れ，流砂，河床変動特性	34
2.4.3.	数値解析による河床変動解析	47
2.4.4.	結語	48
2.5.	結 論	50

第3章 固定床領域を有する河川における環境修復の試みと課題

3.1.	概 説	57
3.2.	調査地の概要	59
3.3.	底生動物の生息状況の事前調査と環境修復のゴール設定	61
3.3.1.	はじめに	61
3.3.2.	事前調査における底生動物の調査方法	62
3.3.3.	事前調査の結果と考察	62
3.4.	小規模な直角水制群による池尻川の環境修復効果と課題	64
3.4.1.	はじめに	64
3.4.2.	対象地点の選定および水理諸元	65

3.4.3.	対象生物と指標生物	66
3.4.4.	直角水制群の施工と配置	68
3.4.5.	モニタリング調査の方法	68
3.4.6.	結果と考察	70
3.5.	結論	73
第4章 移動床と固定床が混在する場の掃流砂，河床変動特性		
4.1.	概説	79
4.2.	掃流砂の伝播速度の違い	80
4.2.1.	はじめに	80
4.2.2.	実験方法	80
4.2.3.	結果と考察	83
4.2.4.	結語	87
4.3.	動的平衡河床の不可逆性と掃流砂・河床変動特性	89
4.3.1.	はじめに	89
4.3.2.	実験方法	91
4.3.3.	実験結果と考察	95
4.3.4.	数値解析法	99
4.3.5.	数値解析による水路実験の再現性検証と掃流砂・河床変動特性の考察	106
4.3.6.	結語	111
4.4.	結論	113
第5章 固定床に設置した水制まわりの流れ，掃流砂，河床変動特性		
5.1.	概説	117
5.2.	直角水制工	118
5.2.1.	はじめに	118
5.2.2.	実験方法（移動床実験と固定床実験）と解析方法	119
5.2.3.	実験結果と考察	124
5.2.4.	数値解析結果と考察	127
5.2.5.	結語	131
5.3.	設置角度の異なる水制工	135
5.3.1.	はじめに	135
5.3.2.	実験方法（固定床実験）と解析方法	136
5.3.3.	実験結果と考察	138
5.3.4.	数値解析結果と考察	140
5.3.5.	結語	143
5.4.	結論	145

第 6 章 固定床河川の類型化と環境修復技術に関する提案	
6.1. 概説	147
6.2. 固定床河川の類型化と水制を利用した環境修復技術の提案.....	147
6.2.1. はじめに	147
6.2.2. 方法	148
6.2.3. 結果と考察	148
6.3. 結論	158
第 7 章 結論と展望	161
謝辞.....	165

第1章 序 論

1.1. 研究背景と目的

河道地形の形成と変動は、河川に棲む水生動物群集の生息状況を強く支配する重要なプロセスである^{1), 2), 3)}など。自然状態の河川では、河道内の土砂が浸食と堆積を繰り返しながら輸送されるため、水理特性や河床材料といった河道内物理環境は時空間的に常に不均質な状態に保たれる。しかしながら、今日の我が国では、全国各地の市街地や農村地域を流れる中小河川に河床から土砂の堆積層が消失した岩盤領域やコンクリート三面張り領域を有する固定床河川が広がり、河道内物理環境の単調化が引き起こす水圏生態系の貧弱化が懸念視されている^{4), 5), 6)}など。たとえば、金澤・三宅⁶⁾によると、固定床領域の河床材料の消失とそれに伴う流れの速さは、特殊な環境に耐え得る限られた生物種のみが卓越する単純な生物相をもたらすことが報告されている。

このような状況に鑑み、近年になり、固定床化の進行する河川においてもある程度良好な河川環境を確保するための環境修復事業が実施されつつある^{7), 8), 9)}など。しかしながら、これらの検討は個別の河川を対象に実施されたものが大半を占め、固定床河川の水理特性や流砂・河床変動特性にまで踏み込んで検討したものは殆ど存在しない。また、市街地や農村地域を流れる中小河川の露岩化の程度やコンクリート三面張り河川への改修度合について整理された資料も少なく、どのような水理特性や河道内物理環境を有する固定床河川が各地に点在するかについてもあまり把握されていない。

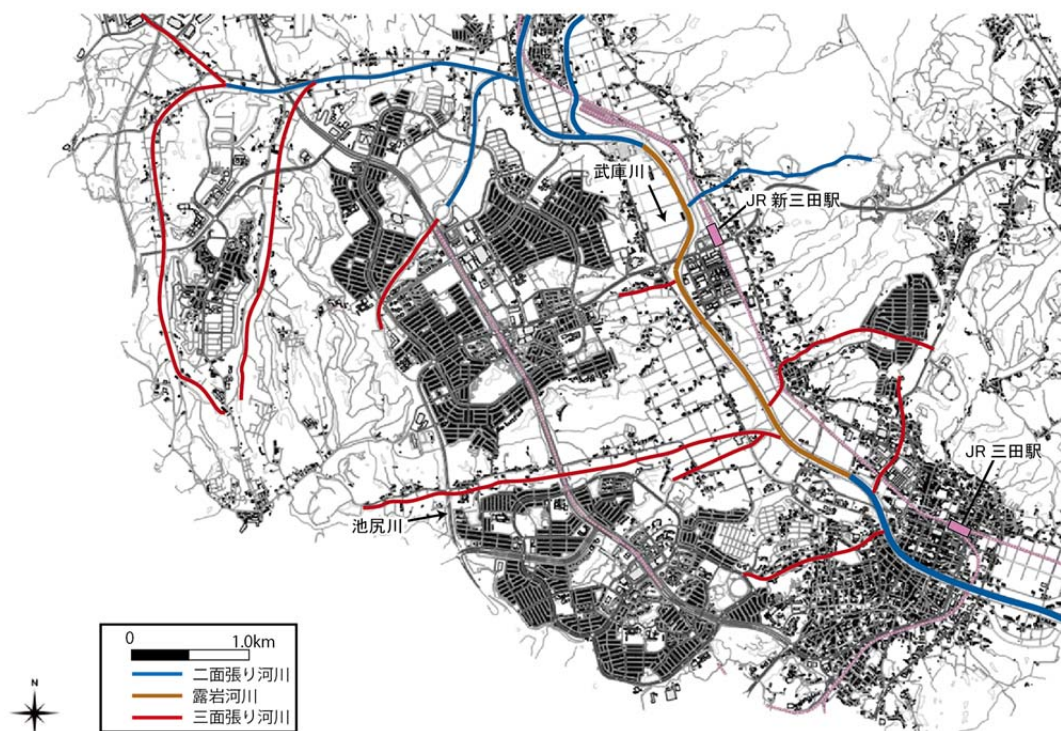


図 1.1.1 兵庫県三田市内(北摂三田ニュータウン付近)を流れる河川の河床の状態

い現状にある。さらには、こうした固定床河川に生息する水生動物群集の生息状況に関する調査報告も限られており、固定床領域にどのような物理環境を創出すれば水生動物群集の生息環境の改善に繋がるかについても殆ど分かっていない。河川に生息する生物種が生活史を完結するには、種特有の成長段階に応じた採餌場所や避難場所、産卵場所といった複数の河道内物理環境^{10), 11)}など が移動可能な範囲に全て存在することが欠かせない。また、同所的に生息する複数種間では、競争や被捕食関係といった種間相互作用が働き、微少な河道内物理環境を種ごとに分割利用すること^{12), 13), 14), 15), 16)}などで共存を可能にすることが知られている。つまり、自然状態の河川では、河床攪乱（最適な攪乱規模や頻度はその場所の生物相によって異なる）によって維持される河道内物理環境の不均一性が、多様で複雑な水圏生態系の成立する流れ場の形成に寄与するものと考えられている^{17), 18), 19)}など。したがって、河床攪乱の殆ど生じない固定床河川においても、河川環境の修復を実現するには川幅拡張によって流路内の掃流力を低下させて砂州（蛇行流路）を形成させる、あるいは河岸沿いに土砂の堆積域を創出し植生繁茂を促すなど、何らかの人為的な対策を施すことで河道内物理環境に不均一性をもたせることが水生動物群集の生息環境の改善に寄与するものと推察される。

固定床領域を有する河川について

今日の我が国の河川では、過度な治水・利水対策による河道内物理環境の単調化と、それに伴う水圏生態系の劣化が懸念視されている。日本の河川では近代史以降、治水対策として耐久性のある工法の発展が望まれてきた²⁰⁾。これは、地形が急峻で災害の頻発する日本の河川では、江戸時代以前より伝わる水制や木工沈床、石積護岸といった伝統的工法のみによって人々の生活圏における洪水や土砂災害を防ぐことが容易でなかったためである。そのため、耐久性に優れ、資材費の安いコンクリート材を用いた治水技術が発達するにつれ、各地の河川にはダムや堰、堤防などが建設され、河道地形ができる限り変化しないように人的管理が行われてきた。しかし、このような河川管理は市街地周辺における大規模洪水や土砂災害の減少に寄与してきた一方で、近年、水質や景観の悪化、攪乱頻度の減少による流砂の輸送および河床変動の緩慢化、それに伴う河道内の植生繁茂や流れの滞筋固定、河床低下による瀬淵の消失や基岩の露出などを招いている。

なかでも、市街地や農村地域を流れる中小河川では、河道地形の変貌が著しく、河床から土砂の堆積層が失われた「固定床領域」を有する河川が全国的に広がっている（代表例として図 1.1.1）。これらの中小河川の固定床化の主な要因は、一つは河床の基岩露出であり、もう一つは治水・利水を目的とする河道のコンクリート三面張り化である。前者は、狭窄部のように掃流力が周辺より相対的に高く人的影響の無い場所で形成されているものと、河川上流域に建設されたダムや砂防堰堤への堆砂に伴うダム下流域への土砂輸送量の減少、あるいは砂利採取や河床掘削に起因する直接的な河床低下などの人為的影響から河床から土砂の堆積層が失われて基岩が露出したものがある。このような露岩河川は、関西近縁においては兵庫県内を流れる武庫川（図 1.1.2 a）や大阪府内を流れる大和川、京都府内を流れる宇治川、三重県内を流れる橿田川など各地に認められる。関西以外においても、石川県内を流れる手取川や北海道内を流れる真駒内川（図 1.1.2 b）など、露岩化の進行する河川は全国的に分布している。

一方、後者のコンクリート三面張り河川は、高い治水安全性や利水効率の確保を目的とした人為

a)



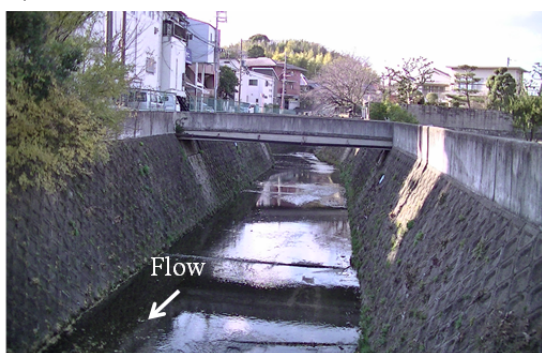
兵庫県三田市内を流れる
二級河川武庫川の露岩領域

b)



北海道札幌市内を流れる
一級河川真駒内川の露岩領域

c)



大阪府千里市内を流れる
コンクリート三面張りの一級河川山田川

d)



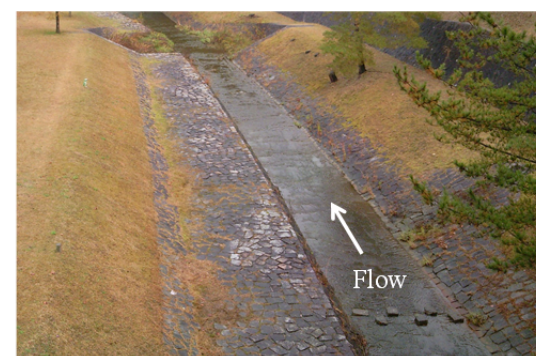
京都府京都市西京区内を流れる
コンクリート三面張りの普通河川上里川

e)



兵庫県三田市内を流れる
コンクリート三面張りの二級河川内神川

f)



兵庫県三田市内を流れる
石張り(三面)の二級河川平谷川

図 1.1.2 固定床領域を有する中小河川

的な河川改修に由来するものである。コンクリート三面張り河川は、砂防河川や高度成長期以降に開発されたやニュータウン地域、あるいは農業用水路など、全国各地の小河川にて普通に認められ

る（2.1 節に詳述）。これらの河川は、河道内に最大限の通水能力をもたせるため、たいてい流路が直線化され、急勾配で、掘り込み型の台形断面河道を有する画一的な形態に改修されている（図 1.1.2 c～図 1.1.2 f）。

河川の固定床領域では、河床浸食が殆ど生じないために滞筋や蛇行流路が形成され難く、河道横断方向に一様で変化のない流れが生じやすい。また、河床が平滑化された固定床領域では、移動床領域と異なり、増水時に河道横断方向全面にわたって非常に流速の速い流れ場が形成されやすい。なかでも、コンクリート三面張り河川のように流路が直線化され、それに伴い急勾配化した固定床河川では、流路の直線区間において射流流れとなる領域が形成されることも十分に想定される。さらに、固定床領域では河床と砂礫の間の摩擦角が移動床領域よりも小さくなるため、上流から輸送された流砂は固定床領域に停止することなく下流域へと輸送されやすい。これらの要因から、ダム下流の露岩河川やコンクリート三面張り河川のように上流からの土砂供給量の少ない固定床河川では、時間経過と共に河道内に土砂が自然と堆積して河道内物理環境の多様性が回復することを期待できない場が多い。したがって、このような固定床領域を有する河川では上述したとおり、流れの速さや河床材料の消失といった特殊な環境に適応できる限られた種類のみが高密度な群集を成立する貧弱な生態系が形成されることとなる⁶⁾。

我が国の河川環境の配慮への取り組みについて

我が国の河川整備事業では、平成9年に河川法が一部改正され、「治水・利水・環境」のバランスに配慮した川づくりへの要望が高まっている（2.2 節に詳述）。本研究で対象とする中小河川においても、平成20年に「中小河川に関する河道計画の技術指針」が策定され、治水・利水重視の河道計画から環境にも配慮した整備を行うことが定められた。冒頭に述べた通り、多様な生物を育む河川環境を創出するには、河床が定期的に攪乱され、河道内に不均質な河道内物理環境が確保されることが重要である。そのため、中小河川に関する技術指針では、多様な河道内物理環境を創出するため、川幅をできる限り広く採用する川づくりを目指すことが明記されている（2.1.3 節にて詳述）。

しかしながら、これらの河川整備指針は主に移動床河川を対象としたものであり、固定床化の進行する河川については何も言及されていない。これは、環境修復への取り組みが生態学と土砂水理学分野の融合研究領域といった発展途上な分野であること、および移動床と固定床が混在するような流れ場における流砂・河床変動特性に関する土砂水理学的な知見が少なく^{21), 22), 23)}、事業実施後の河床地形や土砂の堆積域の粒度分布等を予測することが難しい点などが理由として挙げられる。実際、固定床領域を有する河川を対象に環境修復を実施し、水生動物群集の生息状況の変化を調べた報告は幾らか存在するものの^{7), 8), 24), 25)}、こうした事業がもたらす効果を固定床河川の水利特性や流砂特性までを考慮したうえで考察したものは殆ど存在しない。つまり、現状では固定床河川の環境修復に関する技術的な知見は乏しく、具体的手法は殆ど確立されていないと言える。なかでも、コンクリート三面張り河川を対象とした環境修復に関する技術報告は特に少なく、土砂水理学的な知見に留まらず、水生動物群集の分布様式や生息状況に関する報告もほぼ存在しない。これは、コンクリート三面張り河川の大半が人々の生活圏の近くを流れているため、これまで治水や利水面が優先され、河川環境が顧みられることが少なかったためと推察される。コンクリート三面張り河川

は堤防や堤防近くまで土地利用されている場合が多く、社会的制約から堤外地を拡張し、砂州や蛇行流路の形成を促すなどの具体的対策を講じることが難しい。さらに、上述したとおり上流からの土砂供給量の少ない河川も多く、河道内物理環境の多様性を取り戻すための技術を確立するには解決すべき課題が幾つも存在する。

以上の背景を踏まえると、将来的に土砂水理の力学に基づいた固定床領域を有する河川の環境修復技術および河道計画の考え方を確立させるには、次の3つの課題を解決する必要があると考えられる。

1 つ目は、移動床と固定床が混在する場における流砂の輸送特性および河床変動特性を把握することである。これより、固定床領域に土砂が堆積する際のプロセスや土砂の供給条件等に関する知見を得ることが出来れば、水理特性の異なる固定床河川ごとに適切な環境修復技術の検討や環境修復事業を実施した後の河道地形の将来予測等を行うことが可能になると考えられる。

2 つ目は、固定床河川における現実的な環境修復の目標設定と、それを実現するための技術を提案することである。現状では、固定床河川のどこに、どのような物理環境を創出すれば河川環境の修復が実現可能となるかに関する知見は殆ど存在しない。さらに、仮にこうした物理環境が生態学的知見などから定まったとしても、それを固定床河川にて実現させるための土木技術にも未解明な部分が多い。たとえば近年、移動床河川では多様な河道内物理環境を取り戻すための事業が進められ、水制等を利用した河川環境の修復事例が蓄積されつつある^{26), 27), 28)}など。しかし、河川の移動床と固定床では流砂の輸送特性や河床変動特性が異なるため、これらの既存報告を固定床河川にどの程度適応できるかについては不明な点が多い。

3 つ目は、固定床河川を対象とした環境修復事業を検討するにあたって、上記の技術的課題の解明に加え、どのような物理環境を有する固定床河川が存在するかについての現状把握を行うことである。固定床河川を水生動物群集の生息状況に影響を与える物理環境から類型化することが出来れば、河川の類型タイプごとに異なる流砂・河床変動特性と治水安全性の確保などの社会的制約の両者を踏まえた実現可能なマネジメント案の見通しが立てやすくなると考えられる。

以上の課題を踏まえ、本研究では固定床領域を有する中小河川を対象とし、図 1.2.1 に示す第3章～第6章までの検討を実施した。本研究の主な成果は次のとおりである。まず、第3章では実際のコンクリート三面張り河川（図 1.1.1 に示す武庫川水系池尻川）を対象とし、底生動物群集の生息状況の把握と、小規模水制群を用いた底生動物群集の生息場所の環境修復の試み、およびモニタリング調査による環境修復効果の確認と課題の把握までを実施した。次いで、第3章で示した課題解決に向け、第4章では移動床と固定床の混在する場における流砂・河床変動特性を水路実験および数値計算から把握した。これより、広域的に固定床の露出する場では、同一水理条件下の移動床のみの場に比べて流砂の伝播速度や砂州の伝播速度が速くなるため、上流から与える給砂量を増やしても簡単には河道全面が移動床に戻れない「動的平衡河床の不可逆性」が存在することを示した。そこで、次の第5章では、固定床領域全面に土砂を堆積させるのではなく、河岸沿いにのみ土砂の堆積域を創出する（植生繁茂を促すため）ことを目的とし、移動床と固定床上に設置された水制ま

わりの流れ，掃流砂，河床変動特性について比較検討すると共に，固定床に適する水制配置について検討した。第6章では，関西地区に位置する3つの市街地を流れるコンクリート三面張り河川を対象とし，河道内の植生のカバー率に影響を与える物理環境から固定床河川を類型化することを試みた。同時に，第3章～第5章までの成果を参考とし，これらの固定床河川の類型タイプごとに適すると考えられる環境修復の方法の提案までを行った。

1.2. 研究の構成

本論文の構成は，以下に示すとおりである。

第1章：序論

第2章：中小河川の概要と従来の研究

第3章：固定床領域を有する河川における環境修復の試みと課題

第4章：移動床と固定床の混在する場における掃流砂，河床変動特性

第5章：固定床に設置した水制まわりの流れ，掃流砂，河床変動特性

第6章：固定床河川の類型化と環境修復技術に関する提案

第7章：結論

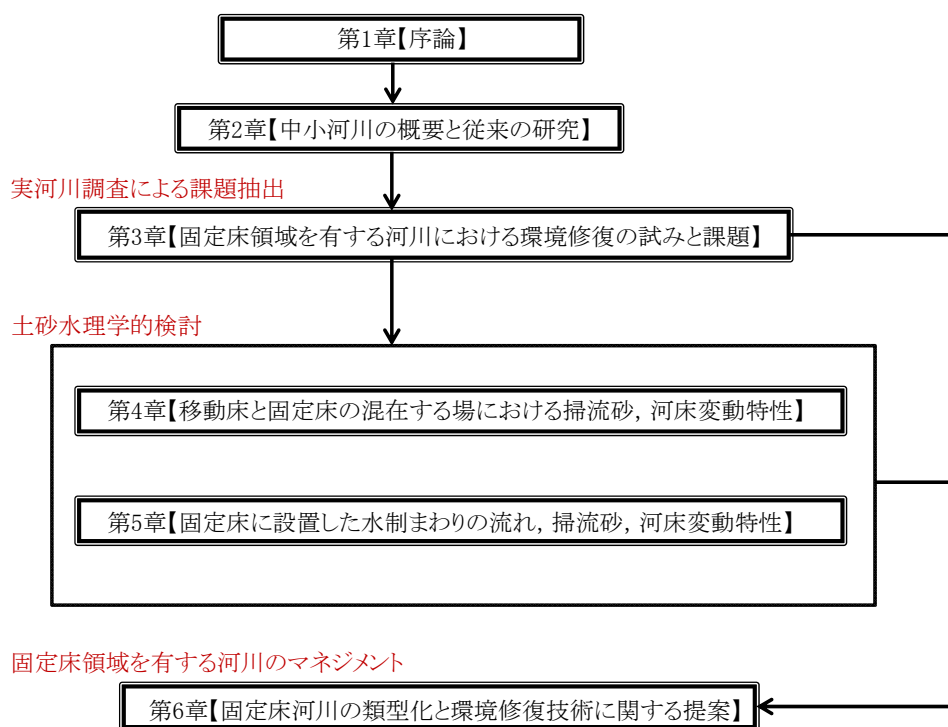


図 1.2.1 本論文の構成

各章の具体的内容は以下のとおりである。

まず第1章の序論では、本論文の研究背景と目的について概説した。

第2章では、1) 国内の中小河川の現況を概説すると共に、従来の研究のレビューとして、2) 固定床河川の環境修復に関する生態学的知見と土砂水理学的知見、3) 固定床領域を有する場の流砂・河床変動特性に関する土砂水理学的知見と平面2次元河床変動解析、4) 環境修復技術の一つとして近年注目される水制に関する土砂水理学的知見について順に整理した。これらのレビューにより、現状にて固定床河川の環境修復に関する技術基準はほぼ存在しないこと、固定床と移動床が混在するような流れ場における流砂・河床変動特性に関する土砂水理学的知見には未解明な部分が多いこと、そして、環境修復技術として近年注目される水制について、固定床河川にて水制を利用した環境修復事例は幾らか存在するものの、固定床領域に設置された水制まわりの流砂・河床変動特性までを把握した報告は殆ど存在しないことを示した。

第3章では、実際のコンクリート三面張り河川（武庫川水系池尻川）を対象とし、1) 河道内の微地形に対応した水生動物群集（ここでは底生動物群集に着目）の生息状況の特徴を把握すると共に、2) 小規模な水制群を利用した環境修復の試みを実施し、その効果と課題を確認した（ただし、実験開始時において固定床河川に適する水制工の設計に関する技術資料が存在しなかったため、ここでは移動床河川に関する水制工の技術資料を用いた）。これより、移動床河川に関する水制工の技術資料や既存の研究報告の内容は、固定床河川にそのまま適応できない可能性を示した。

第4章では、移動床と固定床の混在する場を対象とし、1) 水路実験にて、固定床と移動床では掃流砂の伝播速度が異なること、および固定床においては給砂の総量が同じであっても土砂の与え方に応じて掃流砂の伝播速度が異なることを示した。次いで、2) 水路実験にて、固定床の露出が一度進んだ領域では、上流から同一水理条件下における移動床の平衡流砂量程度の土砂を供給しても移動床河川へと戻らない「動的平衡河床の不可逆性」が存在することを示した。その後、3) 固定床領域を有する場の流砂特性を考慮した平面2次元河床変動解析プログラムを構築し、実験結果の再現性の検証および固定床と移動床の混在する場における掃流砂、河床変動特性を検討した。

第5章では、固定床河川の側壁沿いのみ土砂を堆積させる方法として水制工に着目し、1) 水路実験と数値解析から、移動床と固定床に設置された直角水制近傍の掃流砂、河床変動特性の違いを示した。同時に、第3章にて移動床河川に関する既存の水制群の設計指針がコンクリート三面張り河川の側壁沿いに土砂を堆積させなかった理由を考察した。次いで、2) 水路実験と数値解析から、固定床河川の側壁沿いに土砂を堆積させることができる水制配置について検討した。

第6章では、固定床河川の代表としてコンクリート三面張り河川を取り上げ、関西地区に位置する3つの市街地を流れる中小河川のコンクリート三面張り河川への改修度合いを把握すると共に、これらの河川を物理環境から類型化することを試みた。その後、このコンクリート三面張り河川の類型タイプに露岩河川も含め、第3章～第5章までの成果を参考に固定床河川の類型タイプごとに適する環境修復の方法について考察した。

第7章は結論と展望である。

なお、本研究にて対象とする「固定床河川」とは、古くから基岩露出が卓越するような山地溪流にある岩盤河川でなく、近年になって河床の固定床化が進んだ露岩河川やコンクリート三面張り河川であることを改めてここに述べておく。これらの河川では、固定床河床の流れの速さや河床材料の消失が要因となり、限られた生物種のみが高密度で生息する貧弱な河川生態系をもたらすことが懸念されている。しかしながら、これらの固定床河川は人々の生活圏に近いところを流れるものが多く、流路が直線化されたために急勾配であり、上流からの土砂供給量の少ない河川も少なくない。このため、こうした固定床河川では河道内に土砂が堆積し難く、時間経過と共に河道内物理環境の多様性が自然と回復することをあまり期待できない。

参考文献

- 1) Statzner, B., Gore, J. A. and Resh, V. H.: Hydraulic stream ecology: Observed patterns and potential applications, *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4), pp.307–360, 1988.
- 2) Davis, J. A. and Barmuta, L. A.: An ecologically useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers, *Freshwater Biology*, 21(2), pp.271-282, 1989.
- 3) The ASCE Task Committee on Sediment Transport and Aquatic Habitats, Sedimentation Committee: Sediment and aquatic habitat in river systems, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), pp.669-687, 1992.
- 4) Takahashi, G. and Higashi, S: Effect of channel alteration on fish habitat, *Japanese Journal of Limnology*, 45(3), pp.178-186, 1984.
- 5) 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進: 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響, *応用生態工学会誌*, 4(2), pp.133-146, 2001.
- 6) 金澤康史・三宅洋: コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, *応用生態工学会誌*, 9(2), pp.141-150, 2006.
- 7) 石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・剣持浩高・高橋浩輝・丸岡 昇・岩瀬 晴夫: 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価, *応用生態工学会誌*, 12(1), pp.57-66, 2009.
- 8) 豊島照雄・中野繁・井上幹生・小野有五・倉茂好匡: コンクリート化された河川流路における生息場所の再造成に対する魚類個体群の反応, *日本生態学会誌*, 46(1), pp.9-20, 1996.
- 9) 角野康郎・安田忍・大亦昌史・衣笠浩二: 和歌山県荒見井水路の改修にともなうリュウノヒゲモ群落保全の取り組み, *応用生態工学会誌*, 11(1), pp.103-106, 2008.
- 10) 柴田篤弘・谷田一三: 日本の水生昆虫一種分化とすみわけをめぐって, 東海大学出版会, 東京, 1989.
- 11) Edo, K. and Suzuki, K.: Preferable summering habitat of returning adult masu salmon in the natal stream, *Ecological Research*, 18(6), pp.783-791, 2003.

- 12) 井上幹生・中野繁: 小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所, 日本生態学会誌, 44(2), pp.151-160, 1994
- 13) Cummins, K. W.: Factors limiting the microdistribution of the caddisflies *Pycnopsyche lepida* (Hagen) and *Pycnopsyche guttifer* (Walker) in a Michigan stream (Tricoptera: Limnephilidae), *Ecological Monographs*, 34(3), pp.271-295, 1964.
- 14) Buffagni, A., Crosa, G. and Marchetti, R.: Size-related shifts in the physical habitat of two mayfly species (Ephemeroptera), *Freshwater Biology*, 34(2), pp.297-302, 1995.
- 15) Hidlrew, A. G. and Edington, J. M.: Factors facilitating the coexistence of Hydropsychid caddis larvae (Tricoptera) in the same river system, *Journal of Animal Ecology*, 48(2), pp.557-576, 1979.
- 16) 三橋弘宗: アツバエグリトビケラ属2種の流程分布, 生活史及び微生息場所, 陸水学雑誌, 61(3), pp.251-258, 2000.
- 17) Connell, J. H.: Diversity in tropical rain forests and coral reefs, *Science*, 199(4335), pp. 1302-1310, 1978.
- 18) Resh, V. H., Brown, A. V., Covich, A. P., Gurtz, M. E., Li, H. W., Minshall, G. W., Reice, S. R., Sheldon, A. L., Wallace, J. B., Wissmar, R. C.: The role of disturbance in stream ecology, *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4), pp.433-455, 1988.
- 19) Ward, J. V. and Stanford, J. A.: Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation, *River Research and Applications*, 11(1), pp.105-119, 1995.
- 20) 橋本規明: 新河川工法, 東京, 森北出版, 1956.
- 21) 竹林洋史・江頭進治・金海生: 交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級, 水工学論文集, 41, pp.895-900, 1997.
- 22) Takebayashi, H., Okabe, T. and Shinozaki Y.: Geometric characteristics of bars on layers with rocks or cohesive material, *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*, pp.267-277, 2007.
- 23) 早川博・宮本大・夏井皓盛: 屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.781-786, 2011.
- 24) 梶野健・浅見和弘・中畠一彦・杉尾俊治・林貞行・高橋陽一: 浦山ダム下流に投入した土砂がウグイの産卵にもたらす効果について: ダム下流河川における土砂投入の効果, 応用生態工学会誌, 6(1), pp.51-58, 2003.
- 25) Roni, P., Bennett, T., Morley, S., Pess, G. R., Hanson, K., Slyke, D. V. and Olmstead, P.: Rehabilitation of bedrock stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota, *River Research and Applications*, 22(9), pp.967-980, 2006.
- 26) Shields Jr., F. D., Cooper, C. M. and Knight, S. S.: Experiment in stream restoration, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), pp.494-502, 1995.
- 27) Hartman, K. J. and Titus, J. L.: Fish use of artificial dike structures in a navigable river, *River Research and Applications*, 26, pp.1170-1186, 2010.

- 28) Radspinner, R. R., Diplas, P., Lightbody, A. F. and Sotiropoulos, F.: River training and ecological enhancement potential using in-stream structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136, pp.967-980, 2010.

第2章 中小河川の概要と従来の研究

ここでは、第3章以降の検討に先立ち、1) 中小河川の概要を把握すると共に、従来の研究のレビューとして、2) 固定床河川における既往の環境修復事例と課題、3) 固定床領域を有する場の掃流砂・河床変動特性と数値解析法、4) 環境修復技術の一つとして注目される水制に関する土砂水理学的知見について整理する。

2.1. 中小河川の概要

2.1.1. 固定床領域を有する中小河川

我が国で中小河川と定義される河川（図2.1.1）は、流域面積の規模が概ね 200km^2 未満、河川の重要度がC級以下の河川であり^{1),2)}、全国の総河川延長の90%近くを占めている。中小河川は大河川に比べて河川敷までのアクセスが良く、水資源としての利用が比較的容易なため、古い時代から人々の生活と密接に関わってきた^{3),4)}。しかしながら、近年の都市化の進行に伴い市街地近郊を流れる中小河川では河川改修が進み、河床低下によって露岩化したもの、コンクリートの排水路と化したもの、フェンスが張り巡らされて近づくことができなくなったもの、蓋がされて暗渠化されたものが多数見受けられる⁴⁾。

市街地近郊を流れる中小河川は、土地利用の制約から計画洪水規模が1/10年～1/50年程度と小さいものが多く、大河川に比べて超過洪水に対して十分な河積を有していない³⁾。このため、従来の中小河川の河川改修では、洪水を効率的に流下させることに重点を置いた対策が行われ、流路の直線化やコンクリート製の側壁護岸の施工、そして小規模な河川を中心に掘り込み型の台形断面河道を有するコンクリート三面張り河川への画一的な河川改修が行われてきた^{3),4)}。このような河川改修の結果、

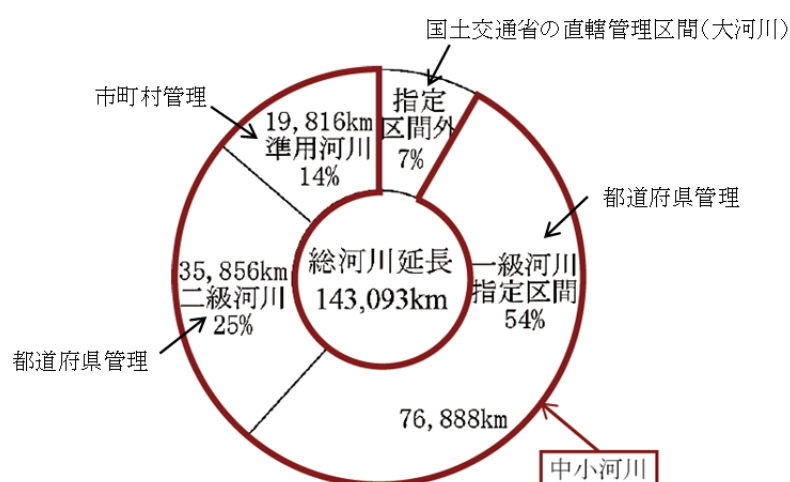


図 2.1.1 法河川指定延の概要(建設省河川局⁵⁾)

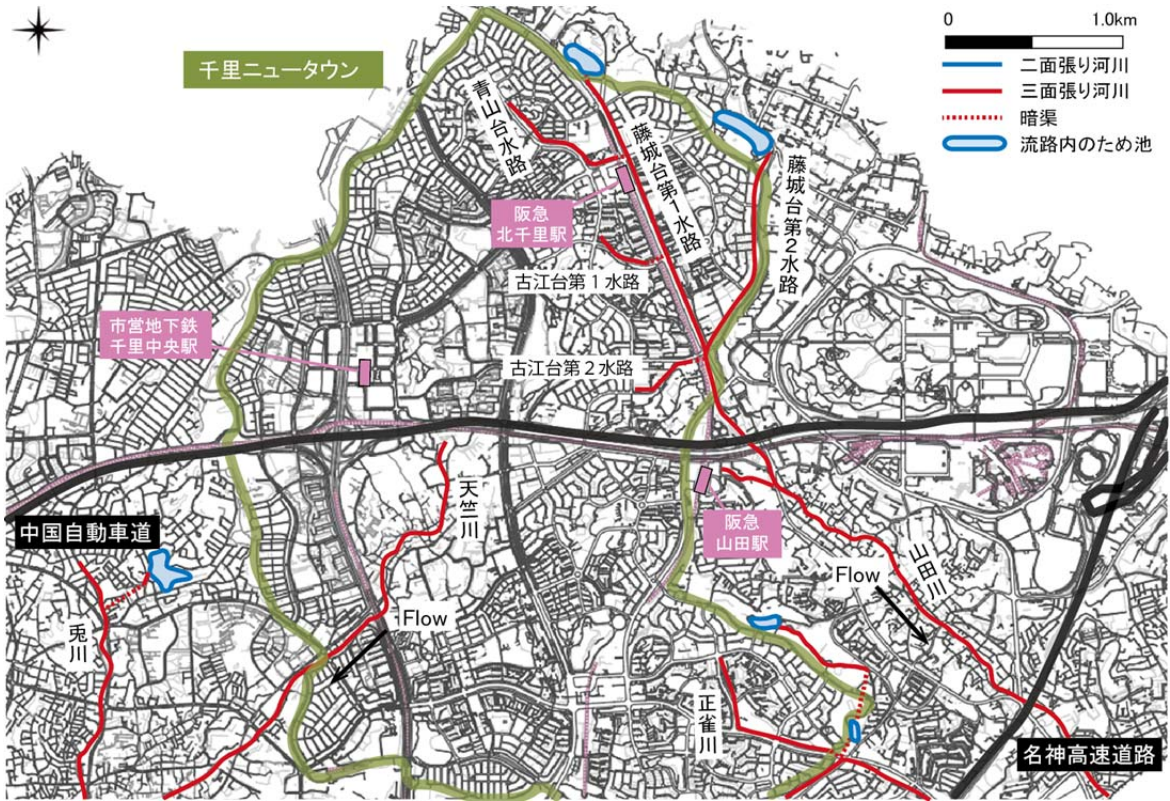


図 2.1.2 大阪府の千里ニュータウン(豊中市・吹田市)周辺を流れる主要河川(主要水路)の河川形態。千里ニュータウンは日本最初の大規模ニュータウンで、事業主体は大阪府企業局、開発面積は約1,160ha、新住宅市街地開発法(1963年施工)を初適用して開発されている。

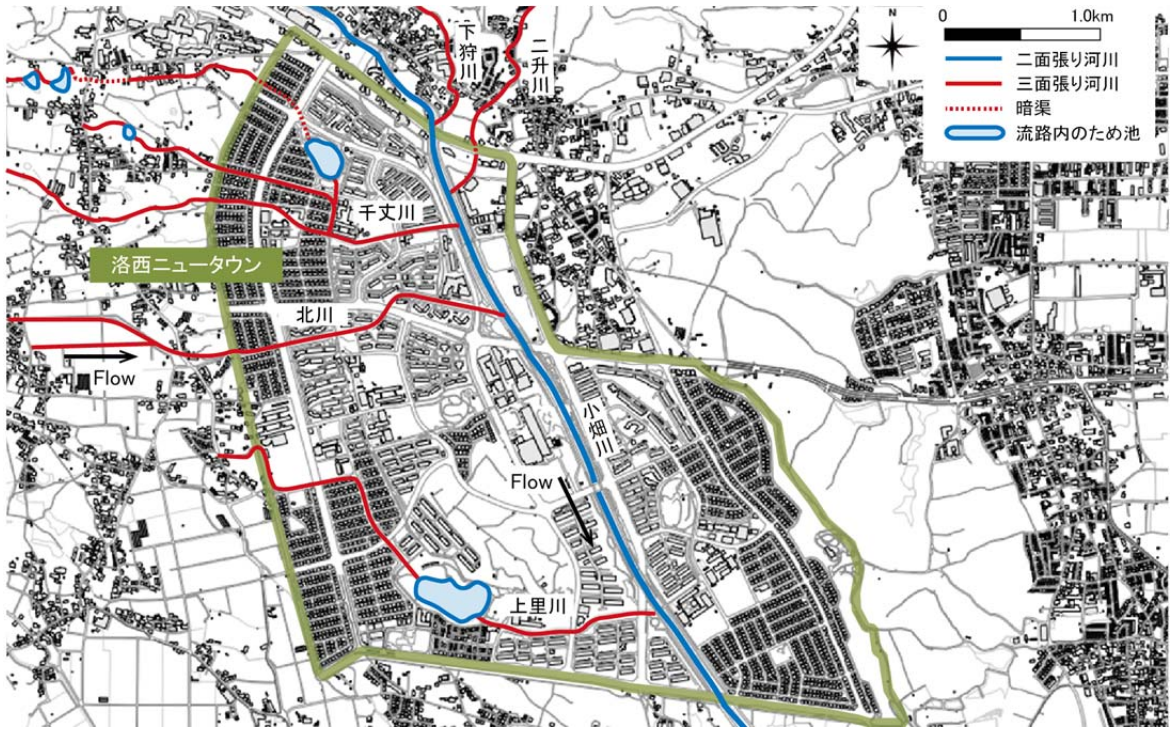


図 2.1.3 京都市の洛西ニュータウン(西京区南西部の大原野地区)周辺を流れる主要河川の河川形態。
洛西ニュータウン(1970 年代～)は京都市最初の大規模ニュータウンで、事業主体は京都市住宅供給
公社、開発面積は約 260ha、新住宅市街地開発法を適用して開発されている。

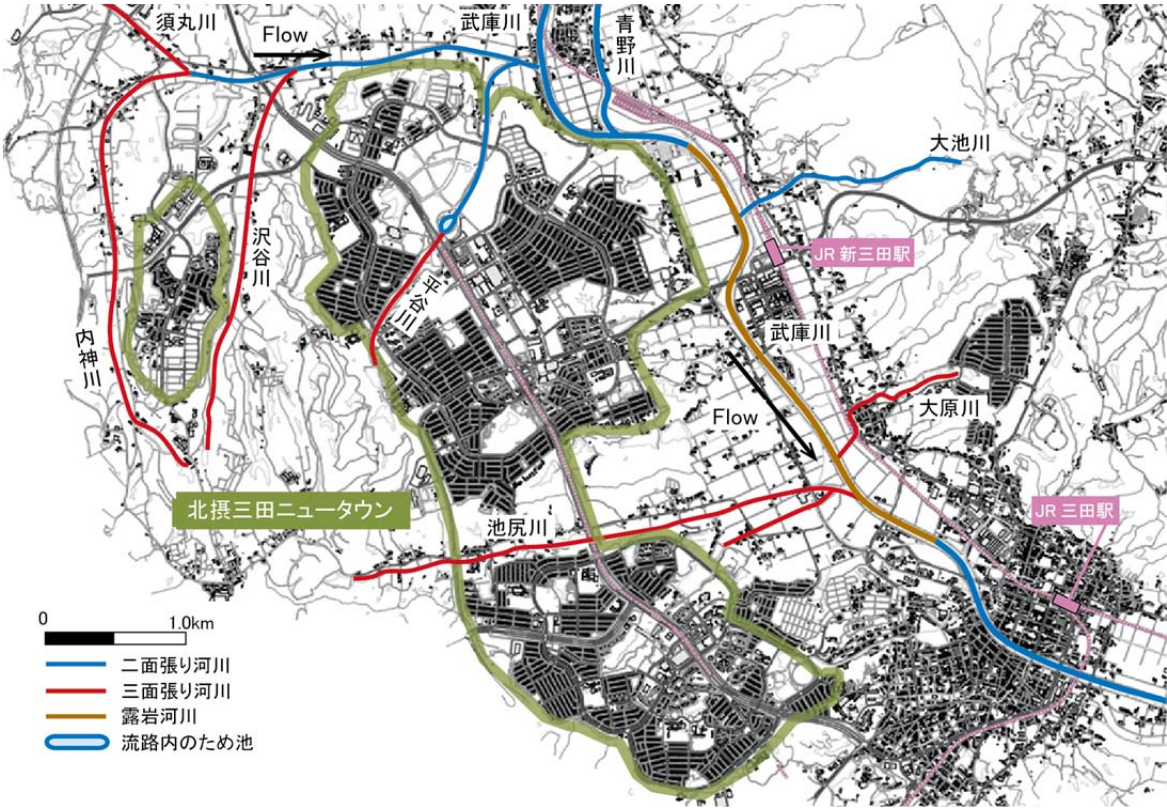


図 2.1.4 兵庫県の北摂三田ニュータウン(三田市)周辺を流れる主要河川の河川形態。北摂三田ニュータウン(1980 年代～)の事業主体は兵庫県と都市開発公団で、開発面積は約 1,200ha、新住宅市街地開発法を適用して開発されている。1988 年から人口増加率が 10 年連続日本一であった。

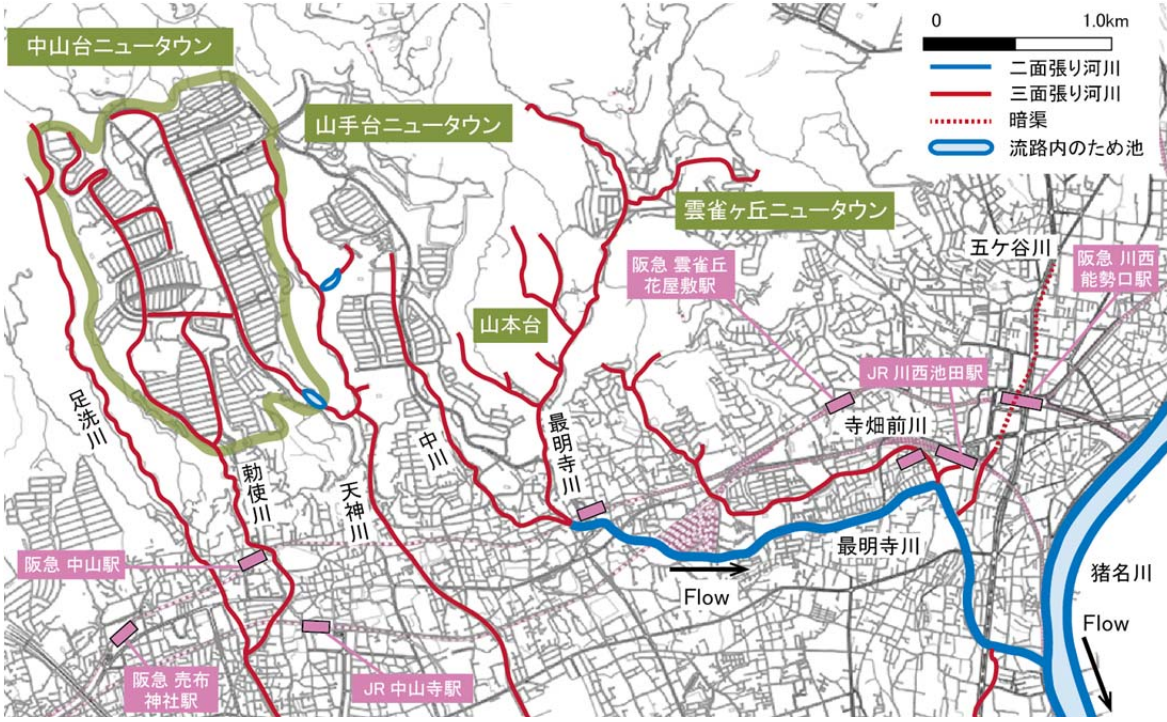


図 2.1.5 兵庫県の中山台ニュータウン(宝塚市)周辺を流れる主要河川の河川形態。中山台ニュータウン(1970 年代～)の事業主体は民間開発会社(クラレ不動産)で、開発面積は約 159ha、新住宅市街地開発法を適用して開発されている。

現状の中小河川の多くは単断面の掘り込み河道となり、蛇行や砂州等の存在しない単調な流れ場を形成している。同時に、堰や床固め等により河道縦断方向の流れの連続性が失われると共に、コンクリート製の側壁護岸により流路と陸域との横断方向の物理環境の連続性も失われた河川が多い。

なかでも、高度成長期以降に開発されたニュータウン地域は丘陵地を切り開いて宅地造成されたケースが多く、流下能力の向上を目的とした小河川のコンクリート三面張り河川への改修率が非常に高い。しかしながら、これらの地域における河川の改修事業を整理した資料は殆ど公表されておらず、その現状を一瞥して把握することは難しい。そこで、図 2.1.2～図 2.1.5 に、関西地区の 4 つのニュータウン地域周辺を流れる中小河川の河床形態を示す（著者による調査結果）。詳細な考察は第 6 章で述べるものの、ここでは図 2.1.2～図 2.1.5 に示す市街地周辺ではある程度規模の大きい河川以外、ほぼ全ての河川がコンクリート三面張り河川に改修されていることに注目して欲しい。図 2.1.2～図 2.1.5 に示すニュータウン地域は、京都府の洛西ニュータウンを除き、都心に働く人々のベッドタウンとしてかなり居住者の多い地域である。これらの地域には、家族連れの居住者が多いため、景観配慮の一つとして河川周辺に親水公園や河畔林（写真 2.1.1）が残されたものが少なくない。しかしながら、これらの水域は一見良好な自然が残されているように見えるものの、現地に赴き各河川の河床の状態を確認すると、ほぼ全ての中小河川が河道に土砂の堆積域を殆ど有しないコンクリート三面張り河川であることが分かる。つまり現状では、我が国の大多数の人々にとって最も身近で目にする機会の多い河川とは、相対的な評価ではあるものの自然河川とは程遠い景観や河川環境を有するコンクリート三面張り河川であるものと推察される。

このような固定床領域を有する河川では、第 1 章で述べたように河床材料の消失や流れの単調化に伴い河道内物理環境が単調化するため、限られた生物種のみが生息する貧弱な河川生態系となり確立されておらず、環境修復を実施するとしても具体的な対策を立てることが難しい状況にある。したがって、今後、このような固定床領域を有するコンクリート三面張り河川、あるいは露岩河川を対象として良好な景観や河川環境を長期的に維持・形成する川づくりを実現には、環境修復事業を実施しやすい固定床河川の選別方法や、固定床河川にて治水と環境とのバランス化を図るための具体的な環境修復技術の確立が必要になると考えられる。



写真 2.1.1 コンクリート三面張り河川と堤防周辺に残された河畔林,
左) 千里ニュータウンを流れる山田川, 右) 千里ニュータウンを流れる藤白台第 2 水路

2.1.2. 中小河川の河道計画

表 2.1.1 に示すように平成 9 年（1997 年）に河川法の一部が改正され、我が国の河川の治水計画および河道計画策定に関する考え方は大きな方向転換を迎えた。河川法が改正に至るまでのプロセスは、まず平成 2 年に「多自然型川づくりの推進について」の通達が行われ、今後の河川整備では「多自然型川づくり」として、水生生物にとっての良好な生育環境に配慮すると共に、美しい河川景観を保全・創出することが推奨された。平成 5 年には環境基本法が制定され、それに伴い市街地を対象とした「都市河川計画の手引き」の策定も行われた。これより、都市や市街地周辺においても、河川を水生生物の貴重な生息空間として認識し、同時に人々の親水空間を豊かにするための川づくりを行うことが推奨された。その後、平成 9 年に上述した通り河川法の一部が改正され、ここで初めて我が国の河道計画に「治水」、「利水」のみでなく、「環境」へも配慮することが法的に定められた。しかしながら、中小河川が多自然型川づくりは期待したものと異なり、環境保全ブロック^{※1}を護岸に配置しただけの画一的な川づくりが成されるケースも少なくなかったようである⁹⁾。

こうした中小河川の川づくりの課題は、平成 18 年の『多自然型川づくり』から『多自然川づくりへ』の提言⁹⁾の中で指摘され、それと共に新しく「多自然川づくり基本指針」が策定された。これは、これまでの画一的な多自然型川づくりを反省し、河川全体の自然の営みを視野に入れた川づくりを目指すことを再度明記したものである。具体的には、1) 可能なかぎり自然の特性やメカニズムを活用して川づくりを行うこと、2) 地域の歴史や文化との調和に配慮した川づくりを行うこと、3) 河川が本来有している生物にとっての生息場所や繁殖環境を河道内に確保した川づくりを行うこと、4) 多様な河川景観を保全・創出するための河川管理を行うことの 4 点が定義づけられている。つまり、これまでの環境保全ブロックを用いたような画一的な環境配慮ではなく、地域固有の自然環境や文化を尊重し、それを活かすための川づくりが改めて求められたといえる。

平成 20 年には「中小河川に関する河道計画の技術指針」が策定され、ここで初めて我が国の中小河川のみを対象とした河道計画の基本指針が定められた。本指針は平成 22 年に一部改訂され、表 2.1.2 に示すように、「治水」と「環境」とを合わせた総合的な中小河川の河川整備を行うための基本的事項が述べられている。簡単に要約すると、一般的な中小河川の川幅は狭く単断面形状であり、周辺の土地利用の制約を受けやすい（堤外地を広く確保することが難しい）ことを考慮し、改修時は護岸を 5 分勾配に立て、河床幅を可能な限り広くとることが推奨されている。同時に、中小河川の治水対策には基本的に川幅拡幅で対応し、河床掘削や滞筋変更を極力行わないことが推奨されている。

しかしながら、これらの中小河川に関する河道計画の技術指針は、河道に十分な土砂の堆積層を有する移動床河川を前提として記述されたものである。つまり、現状では、本研究で対象とする固定床領域を有する中小河川において「治水・利水・環境」を満足させるための技術指針はほぼ存在しないと言える。

※1 本呼称は、環境を頭に冠した製品を使用さえすれば河川環境に配慮したことになるとの誤解を招く一面が見受けられたため、平成 18 年の「美しい山河を守る災害復旧基本方針」の一部改訂以降、使用されないこととなった。

2.1 中小河川の概要

表 2.1.1 治水・河川計画策定における考え方の変遷(中小河川に関するもの)

年代	河川整備に関する法律等	技術指針	都市開発(河川含む)に関する法律・技術指針
明治 29 年(1886 年)	旧河川法(治水)		
昭和 29 年(1954 年)			土地区画整理法
昭和 38 年(1963 年)			新住宅市街地開発法
昭和 39 年(1964 年)	新河川法(治水+利水)		
昭和 43 年(1968 年)			都市計画法
昭和 45 年(1970 年)	水質汚濁防止法		
昭和 47 年(1972 年)	自然環境保全法		
昭和 48 年(1973 年)	自然再生保全基本法(昭和 48 年)		
平成 2 年(1990 年)		多自然川づくりの推進について	
平成 4 年(1992 年)	地球サミット・アジェンダ 21		
平成 5 年(1993 年)	生物多様性条約		
	環境基本法	環境基本計画の策定	都市河川計画の手引き
平成 9 年(1997 年)	河川法の改正(治水+利水+環境) 環境影響評価法		
平成 14 年(2002 年)	自然再生推進法	新・生物多様性国家戦略の策定	
平成 15 年(2003 年)			都市再生機構法(環境配慮)
平成 16 年(2004 年)	景観法		
平成 18 年(2006 年)		多自然川づくり基本指針	
		美しい山河を守る災害復旧基本指針	
平成 19 年(2007 年)		第三次生物多様性国家戦略	
平成 20 年(2008 年)	生物多様性基本法	中小河川に関する河道計画の技術基準について	
平成 22 年(2010 年)		中小河川に関する河道計画の技術基準について 一部改正	
平成 23 年(2011 年)	水質汚濁防止法 一部改正 環境影響評価法の一部改正		

表 2.1.2 中小河川に関する河道計画の技術基準について」の概要

中小河川に関する河道計画の技術基準について		
計画高水位の設定	・掘り込み河川の計画高水位は、地盤高程度に設定	
法線および川幅	<ul style="list-style-type: none"> ・滞筋の自然環境が良好な場合は法線を極力変更しない ・流下能力の増大には原則として川幅拡幅で対応 ・河岸の自然環境が良好な場合は原則として片岸拡幅 	
横断面形	河床幅	・川らしい良好な自然環境を形成するため河床幅を十分確保
	河岸の法勾配	<ul style="list-style-type: none"> ・自然の復元力を活用するため、法勾配は 5 分勾配が有効 ・河床幅が横断面高さの 3 倍以上確保できる場合には緩勾配を採用
	河床掘削	<ul style="list-style-type: none"> ・平均的な掘削深として 60 cm を上限とすることを原則とする。60 cm 超える場合は、十分な技術的知見を有するも技術者が検討する必要があると大きい。 ・河床掘削する場合は、みお筋等の地形を平衡移動
縦断面形	<ul style="list-style-type: none"> ・河床の安定性と上下流間の生物移動の連続性を確保することに十分に考慮 ・河床掘削する場合には、現況縦断面形を平衡移動 	
粗度係数	・現況が良好な状況の河川では、現況と同程度の粗度係数を設定	
管理用通路	・管理用通路の幅と必要性を検討	
維持管理	・地域住民、市民団体等との連携・共同による順応的管理	

2.1.3. 結 語

上述した社会的背景を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 近年の都市化の進行に伴い、市街地近郊を流れる中小河川では河川改修が進み、河床低下によって露岩化したものや、コンクリートの排水路と化したもの、フェンスが張り巡らされて近づくことができなくなったもの、蓋がされて暗渠化されたものが多数見受けられる。なかでも、ニュータウンのような高度成長期以降に開発された地域では、流下能力の向上を目的とする小河川の人為的なコンクリート三面張り化が著しい。
- (2) 今日、全国各地で良好な景観や多様な水生生物の生息する河川環境を取り戻すための川づくりが求められている。しかし、環境に配慮した河道計画に関する技術指針は移動床河川に対するものに限られ、現状では固定床化の進行する露岩河川やコンクリート三面張り河川のような中小河川を対象とした環境修復に関する技術指針は皆無に近い。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について（平成 20 年 3 月 31 日），交通省河川局, 2008.
- 2) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について（平成 20 年 8 月 9 日），交通省河川局, 2010.
- 3) 山梨県県土整備部治水課：河川ハンドブック，山梨県県土整備部治水課, 2009.
- 4) 中小河川計画検討委員会：中小河川計画の手引き（案）～洪水防御計画を中心として～，（財）国土開発技術センター, 1999.
- 5) 建設省河川局：河川ハンドブック，日本河川協会, 1998.
- 6) 井上幹生・中野繁：小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所，日本生態学会誌，44(2), pp.151-160, 1994.
- 7) 島谷幸宏・小栗幸雄・萱場祐一：中小河川改修前後の生物生息空間と魚類相の変化，水工学論文集, 38, pp.337-342, 1994.
- 8) 金澤康史・三宅洋：コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較，応用生態工学会誌，9(2), pp.141-150, 2006.
- 9) 多自然型川づくりレビュー委員会：一多自然川づくりへの展開ー（これからの川づくりの目指すべき方向性と推進のための施策），国土交通省河川局, 2006.

2.2. 固定床河川における既往の環境修復事例と課題

2.2.1. 環境修復に関する従来の研究と課題

固定床領域を有する河川にて環境修復を試みた事例は、少ないながらも存在する。ここでは、露岩化の進んだ固定床河川およびコンクリート製河床を有する固定床河川における環境修復に関する事例とその成果を概説し、その後、技術的課題について考察する。

露岩化の進んだ固定床河川にて環境修復を試みた事例には、梶野ら¹⁾、Roni et al.²⁾、高橋ら³⁾、石山ら⁴⁾の報告がある。梶野ら¹⁾はダム下流河川に人工的に土砂を投入することにより、一時的ではあるもののウグイ類（魚類）の産卵場が改善することを報告している。Roni et al.²⁾は、アメリカオレゴン州を流れる露岩河川に石堰（Wier）を設置することで、その湛水域にてサケ科などの深みを好む魚類の生息数が増加することを報告している。また、高橋ら³⁾と石山ら⁴⁾は、北海道札幌市を流れる真駒内川の露岩領域に連結玉石からなる水制を設置することで、局所的に土砂が堆積し、その領域にて底生魚類の生息数が増加することを報告している（ただしこの連結玉石の大部分は、写真 2.2.1 に示すように設置から数年後の増水によって流出している）。

一方、コンクリート製河床を有する固定床河川にて環境修復を試みた事例は、豊島ら⁵⁾と角野ら⁶⁾の報告がある。豊島ら⁵⁾は、北海道苫小牧市を流れるパンケナイ川にて、河床を覆うコンクリート製連結ブロックを除去して流路中央部にのみ深みを造成することで、改修 1 年後にはサケ科魚類の生息密度が自然区間と同程度になるまで回復することを報告している。角野ら⁶⁾は、和歌山県紀の川市を流れる水位変動が少ない荒見井水路を対象とし、コンクリート製の河床上に土砂の敷伏と土留工を設置することで、リュウノヒゲモ（水生植物）の生息状況が改善することを報告している。

以上の報告より、事例数は少ないものの固定床河川に置土や水制などの構造物を設置し、河道上に土砂の堆積域を幾分創出することができた場合、水生生物、特に魚類の生息状況の改善に一応の成果が現れるようである。しかし、これらの報告はいずれも固定床河川の環境修復事業前後における地形変化に対する水生生物の生息状況を比較し、河道内物理環境の改善度合いを評価したものであり、固



写真 2.2.1 北海道札幌市を流れる真駒内川の連結玉石水制、

左) 連結玉石水制による土砂の堆積状況（高橋ら³⁾より引用）、

右) 連結玉石水制の流出後（2012/8/30 著者撮影）

定床河川の水利特性や流砂特性までを含めて評価していない点に課題が残る。つまり、固定床上の置土や水制まわりの流砂・河床変動プロセスが把握されていないため、これらの手法をそのまま水利条件の異なる別地域の固定床河川へと適応した場合、既往研究と同等程度の環境修復効果が常に得られるとは限らない。

2.2.2. 土砂水理学的知見に基づく固定床河川の環境修復に関する研究

一方、固定床河川の環境修復を目的とし、土砂水理学の視点から固定床河川に土砂を堆積させる手法を検討した報告として早川ら⁷⁾の検討が存在する。早川ら⁷⁾は、水路実験と平面2次元数値解析から、移動床蛇行水路と固定床蛇行水路における砂礫の停止・堆積条件を比較検討している。その結果、移動床蛇行水路では蛇行部の水衝部付近（外岸側）にて洗掘が顕著になるが、固定床蛇行水路では蛇行部の水衝部付近の水面が盛り上がり流れが淀んだ状態となり、水衝部上流域にて土砂の堆積が生じやすくなることを報告している。また、この固定床蛇行部における土砂の堆積状況は、蛇行の半波長 L / 水路幅 B が一定の場合、図 2.2.1 に示すように蛇行角 θ が大きくなるほど堆積が顕著になることを指摘している。これは、蛇行角が大きいほど固定床上の蛇行部周辺にて無次元掃流力の偏りが大きくなるためである。

上述した早川ら⁷⁾の報告より、堤外地の拡幅が可能な固定床河川においては、人為的な蛇行流路の創出が河道内物理環境の多様化に結びつく可能性が推察される。しかしながら、市街地周辺や農村地域を流れる露岩河川やコンクリート三面張り河川、あるいはコンクリート三面張り用排水路のような固定床河川の場合、土地利用の制約等から堤外地を拡幅することが難しく、固定床河川に蛇行流路を創出することは現実的ではない。したがって、このような河川では、河岸沿いにのみ土砂を堆積させるなど、河道形状を変化させることなく河道内物理環境の多様化を実現するような方法を模索することが望ましいと考えられる。

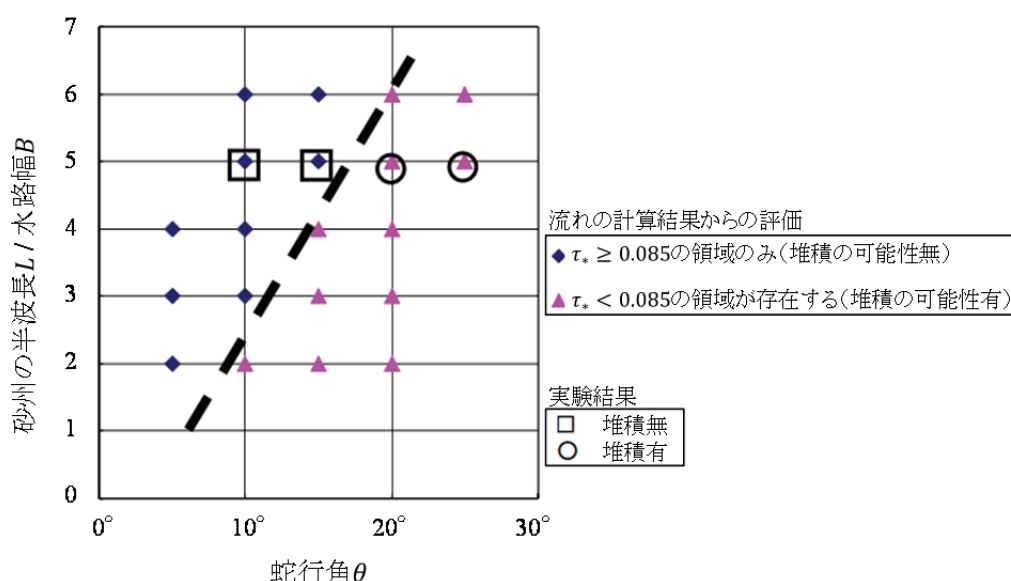


図 2.2.1 固定床蛇行水路における砂州の停止限界(早川ら⁷⁾を一部改変)

2.2.3. 結 語

上述した固定床河川における既存の環境修復事例と技術を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 固定床領域を有する河川における環境修復事例には、置土や連結玉石の設置、コンクリート製河床の除去などの手法を用いたものが幾らか存在する。これらは河道内に深みや局所的な土砂の堆積域を創出することで、サケ科魚類や底生魚類の生息数の増加に寄与することが報告されている。しかし、これらの報告はあくまで環境修復事業の実施前後における生物相のモニタリング調査からその効果を評価したものであり、各河川の水利条件の違いを考慮したうえでの環境修復技術の一般化にまで踏み込めていない。
- (2) 一方、土砂水理学の視点から固定床河川に土砂を堆積させる手法として、早川らによる固定床蛇行水路における砂礫の停止・堆積条件の検討がある。これは、堤外地を拡幅することができる固定床河川には有効な手段となる可能性がある。しかし、市街地周辺や農村地域を流れる河川のように土地利用の制約から堤外地の拡幅が難しい固定床河川を対象とする場合は、河道形状を変化させずに固定床上に土砂を堆積させ、河道内物理環境の多様化を図るような手法を検討することが必要だと考えられる。

参考文献

- 1) 梶野健・浅見和弘・中嶋一彦・杉尾俊治・林貞行・高橋陽一：浦山ダム下流に投入した土砂がウグイの産卵にもたらす効果について：ダム下流河川における土砂投入効果，応用生態工学会誌，6(1)，pp.51-58，2003.
- 2) Roni, P., Bennett, T., Morley, S., Pess, G. R., Hanson, K., Slyke, D. V. and Olmstead, P.: Rehabilitation of bedrock stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota, River Research and Applications, 22(9), pp.967-980, 2006.
- 3) 高橋浩輝・丸山昇・竹内亀代司・渡辺恵三：真駒内川における礫河床の復元に関する実験的研究について（中間報告），リバーフロント研究所報告，18，pp.1-6，2004.
- 4) 石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・剣持浩高・高橋浩輝・丸岡 昇・岩瀬 晴夫：河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価，応用生態工学会誌，12(1)，pp.57-66，2009.
- 5) 豊島照雄・中野繁・井上幹生・小野有五・倉茂好匡：コンクリート化された河川流路における生息場所の再造成に対する魚類個体群の反応，日本生態学会誌，46(1)，pp.9-20，1996.
- 6) 角野康郎・安田忍・大亦昌史・衣笠浩二：和歌山県荒見井水路の改修にともなうリュウノヒゲモ群落保全の取り組み，応用生態工学会誌，11(1)，pp.103-106，2008.
- 7) 早川博・宮本大・夏井皓盛：屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究，水工学論文集，55，pp.781-786，2011.

2.3. 固定床領域を有する場の掃流砂・河床変動特性と数値解析法

本節では，流れの作用を受けて生じる掃流砂（図 2.3.1）について，第3章以降で対象とする 1) 固定床領域の掃流砂と掃流砂量式，2) 固定床領域の掃流砂の堆積限界掃流砂量と輸送特性，3) 固定床領域を流れる流砂の数値解析法と河床変動特性に関する従来の研究について概説する。

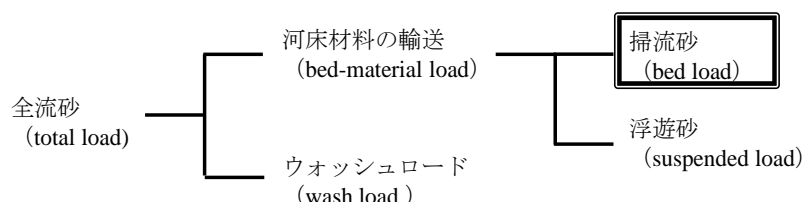


図 2.3.1 流砂の輸送形態

2.3.1. 掃流砂量式

掃流砂とは，河床面に働く掃流力 τ が砂礫の限界掃流力 τ_c を超えると，砂礫が河床材料と交換しながら転動，滑動，躍動するような形で輸送されるものである。ここでは，はじめに移動床と固定床の単位幅あたりの掃流砂量 q_b [m^2/s] を支配する物理パラメーターの違いを整理し，固定床領域の流砂特性，河床変動特性，数値解析法を整理する。

(1) 移動床の掃流砂量を支配する物理パラメーター

移動床河床の単位幅あたりの掃流砂量 q_b [m^2/s] は，一般に式 (2.1) に示すように掃流力 τ_0 （あるいは摩擦速度 u_* ）の関数として与えられる。

$$q_b = f(\tau_0, \tau_c) \quad (2.1)$$

ここに， τ_c は砂礫の移動限界を表す限界掃流力である。

式 (2.1) に示されるように，その場所の掃流力に対して 1 対 1 の関係で定まる掃流砂量を「平衡掃流砂量」と呼ぶ¹⁾。流れが等流の場合，掃流力の大きさはどこも同じであり，全ての断面で同じ掃流砂量，すなわち平衡掃流砂量が移動する¹⁾。この平衡掃流砂量を推定するための評価式を平衡掃流砂量式と呼ぶ。

一方，斜面上や河床の断面積が断続的に変化する場所等では，掃流砂量はその場所の掃流力のみで一義的に決まらず「非平衡掃流砂量」となる¹⁾。このような場所における掃流砂量は，水理量の場所的变化（上下流における流れの加速・減速など）の履歴をうけて変化する。しかし，このような非平衡場であっても，掃流力を規定するための水理量を評価する運動方程式の中に時空間的な流れの非平衡性が考慮されているため，平衡掃流砂量式を用いても実質的には掃流砂の非平衡運動の一部を考慮していることになる¹⁾（ただし，構造物まわりなどの強い 3 次元性を有する非平衡場では，平衡掃流

砂量式の精度は低くなる)。

移動床の平衡掃流砂量を評価する掃流砂量式は、古くから実験的・理論的研究が行われ、多くの式が提案されている。これらの掃流砂量式は、いずれも河床に作用する掃流力と河床材料の限界掃流力との関係性から流砂量の算定しようとするものである。今日、よく用いられる代表的な平衡掃流砂量式には、芦田・道上式²⁾や、Meyer-Peter・Müller式³⁾がある。このほか、土石流から掃流砂までの構成則を統一し、流砂の挙動を水と砂礫の混合物として1流体モデルで扱う江頭の平衡掃流砂量式^{4), 5), 6)}など、掃流砂の移動現象を確率過程として取り扱い、非平衡状態を含む掃流砂量まで評価する中川・辻本式^{7), 8), 9)}などがある。ここでは、本検討で用いる芦田・道上式²⁾を式(2.2)に示す。

$$q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 17\tau_{*e}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \quad (2.2)$$

ここに、 q_{b*} は無次元掃流砂量であり、 $s = (\rho - \rho_s)/\rho$ は砂礫の水中比重、 ρ_s は砂礫の比重(≒2.65)、 d は砂礫の粒径である。 τ_* は、粒径 d に対する無次元掃流力であり、式(2.3)のように砂礫を動かす駆動力($\tau_0 = \rho g h i_b$)と砂礫の河床面での抵抗力の次元($\rho s g d$; 砂礫の水中重量の次元/砂礫の投影面積の次元)との比から無次元化されたものである。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (2.3)$$

τ_{*e} および τ_{*c} は、無次元有効掃流力と無次元限界掃流力であり、各々 $\tau_{*e} = u_{*e}^2/(sgd)$ 、 $\tau_{*c} = u_{*c}^2/(sgd)$ のように定義される。 u_{*e} は、有効摩擦速度であり、芦田・道上²⁾による式(2.4)によって求められる。

$$\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{u_{*e}} = 6.0 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{d(1 + 2\tau_*)} \right) \quad (2.4)$$

ここに、 $\sqrt{u^2 + v^2}$ は断面平均流速である。有効摩擦速度 u_{*e} および無次元有効掃流力 τ_{*e} は、移動床河床では河床形態の変化に伴って流れの抵抗が大きく変動するため、掃流砂量を推定する際に河床の起伏等に由来する流れの抵抗を考慮するために導入されるものである。

u_{*c} は限界摩擦速度であり、一般的に式(2.5)に示す岩垣式¹⁰⁾を用いて評価される。

$$\begin{aligned} d &\geq 0.303 \text{ cm} && ; u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d &\leq 0.303 \text{ cm} && ; u_{*c}^2 = 134.6d^{31/32} \\ 0.0565 \leq d &\leq 0.118 \text{ cm} && ; u_{*c}^2 = 55.0d \\ 0.0065 \leq d &\leq 0.0565 \text{ cm} && ; u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d &\leq 0.0065 \text{ cm} && ; u_{*c}^2 = 226d \end{aligned} \quad (2.5)$$

(2) 固定床の掃流砂量を支配する物理パラメーター

一方、固定床領域を流れる単位幅あたりの掃流砂量 q_b [m^2/s] は、上述の移動床河床の場合の物理パラメーターに加え、式 (2.6) に示すように砂礫と砂礫の内部摩擦角 ϕ_s 、河床面の内部摩擦角 ϕ_{sb} 、および固定床上に存在する土砂濃度 c_s に依存して変化する。このため、固定床領域の掃流砂量は流れの特性から予測することが難しく、移動床河床の場合と比べて非平衡性の強いものとなる。

$$q_b = f(\tau_0, \tau_c, \phi_s, \phi_{sb}, c_s) \quad (2.6)$$

固定床領域では、砂礫と河床との内部摩擦角 ϕ_{sb} が移動床領域よりも小さくなる。固定床領域を流れる砂礫の内部摩擦角に関する報告は幾らか存在するが^{10), 11), 12), 13), 14)}、江頭ら¹⁴⁾は、論文内にて砂礫同士の内摩擦角を $\phi_s = 38.5^\circ$ 、砂礫と塩化ビニール板との内部摩擦角を $\phi_{sb} = 24.8^\circ$ 、砂礫とガラス板との内部摩擦角を $\phi_{sb} = 22.1^\circ$ と与えている。

一方、固定床領域を流れる砂礫の停止限界である無次元限界掃流力 τ_{*c} は、岩垣¹⁰⁾、土屋¹⁵⁾、芦田・道上²⁾によって検討されている。岩垣¹⁰⁾は、固定床領域では粒径の大きい砂礫ほど移動床領域の場合よりも小さい無次元限界掃流力 τ_{*c} で動き出すことを指摘している。また、土屋¹⁵⁾は、滑面固定床水路の下流端と接続する移動床領域における砂礫の移動限界を検討している。その結果、この領域においても粒径の大きい砂礫ほど移動床領域のみから構成される場よりも小さい無次元限界掃流力 τ_{*c} で砂礫が移動することを報告すると共に、上述した岩垣式 (式 (2.5)) を式 (2.7) のように修正している。

$$\begin{aligned} 0.0788 \leq d \leq 6.10 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 20.3d^{2/3} \\ 0.00763 \leq d \leq 0.0788 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 8.73d^{1/3} \\ d \leq 0.00763 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 225d \end{aligned} \quad (2.7)$$

さらに、芦田・道上²⁾は、固定床滑面水路上の砂礫の限界摩擦速度として、式 (2.7) を導出する際に用いる砂礫の動摩擦係数 μ'_f の値を、椿ら¹⁶⁾の実験結果を参考にして $\mu'_f = 1.0$ から $\mu'_f = 0.4$ に変えることで岩垣式を式 (2.8) のように修正している。

$$\begin{aligned} 0.1063 \leq d \leq 8.26 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 8.89d^{2/3} \\ 0.0100 \leq d \leq 0.1063 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 4.17d^{1/3} \\ d \leq 0.0100 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 90d \end{aligned} \quad (2.8)$$

このように、固定床滑面領域を有する場では、移動床領域のみから構成される場に比べて砂礫が転動・滑動しやすく、河床面に砂礫が停止しづらいことが分かる。

(3) 固定床領域における堆積限界掃流砂量と流砂の輸送特性

固定床滑面水路において、砂礫が水路床に堆積する限界状態まで給砂量を増やした場合の掃流砂量は、堆積限界掃流砂量と定義されている。堆積限界掃流砂量については、Ishihara et al.¹⁷⁾、嶋・早川¹⁸⁾、芦田・道上²⁾、岡部ら¹⁹⁾、芦田ら²⁰⁾、江頭ら¹⁴⁾などにより検討されている。

Ishihara et al.¹⁷⁾ は、固定床滑面水路における堆積限界掃流砂量は、砂礫の粒径が大きく、水路勾配が緩やかなほど移動床領域よりも大きくなることを水路実験から示している。同様に、嶋・早川¹⁸⁾ も、固定床滑面水路における堆積限界掃流砂量は、砂礫の粒径が大きいほど粒子が転動しやすいために大きな値となることを水路実験から示している。さらに芦田・道上²⁾ は、このような固定床領域の流砂特性を考慮し、固定床滑面水路における堆積限界掃流砂量を算定する掃流砂量式として式 (2.9) を誘導している。この式は、式 (2.2) に示す芦田・道上²⁾ の移動床の平衡掃流砂量式と同様の考え方から導かれたものであるが、固定床滑面水路における河床近傍流速が砂粒レイノルズ数 Re_* ($= u_* d / \nu$) の関数になることが考慮されている。また、固定床滑面水路には河床波が存在しないとし、有効摩擦速度 u_{*e} は $u_{*e} = u_*$ として扱われている。

$$q_{b*} = \frac{q_b}{u_* d} = \frac{\beta'}{\mu_f'} f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \quad (2.9)$$

ここに、 β' は比例定数、 μ_f' は固定床滑面水路での砂礫の動摩擦係数であり、 β' / μ_f' は実験結果との整合性より 1.0 程度の値をとることが確かめられている (芦田・道上²⁾)。 ν は動粘性係数であり、 $f(u_* d / \nu)$ は $z = d$ の高さにおける u / u_* の値で式 (2.10) より求める。

$$\begin{aligned} u_* d / \nu \leq 6.83 & : u / u_* = u_* z / d \\ u_* d / \nu > 6.83 & : u / u_* = \frac{1}{0.4\varepsilon} \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\varepsilon^2 + 1/4} \right) + 2.5 \left(2\varepsilon + \sqrt{4\varepsilon^2 + 1} \right) + 6.83 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ここに、 $\varepsilon = 0.4(u_* z / \nu - 6.83)$ 、 u は河床から z の高さの流速である。

なお、式 (2.9) の砂礫の限界摩擦速度 u_{*c} および無次元限界掃流力 τ_{*c} には、上述した式 (2.8) に示す芦田・道上²⁾ による固定床滑面水路の砂礫の限界摩擦速度 u_{*c} を用いるものとする。

この他、芦田ら²⁰⁾ と江頭ら¹⁴⁾ は、固定床領域を有する場の流砂の輸送形態を次のように整理している。固定床領域に形成される流砂の輸送形態は、砂粒子と河床の内部摩擦角 ϕ_{sb} が砂礫同士の内部

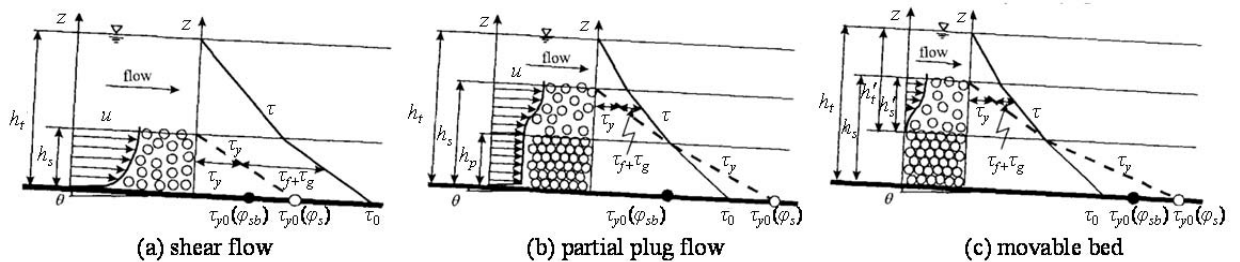


図 2.3.2 流れと流砂の輸送形態の模式図 (江頭ら¹⁴⁾)、ここに h_t は固定床面から水面までの高さ、 h_s は固定床面から掃流砂の存在する高さ、 h_p は partial plug flow が形成される際の土砂の堆積層厚、 u は流速の鉛直分布、 τ はせん断応力、 τ_0 は $z = 0$ におけるせん断応力、 τ_y は砂粒子が受け持つクーロン型降伏応力、 $\tau_d + \tau_f$ は流れに伴う流動応力である。 ϕ_{sb} と ϕ_s は固定床面と砂礫および砂礫同士の内部摩擦角である。

摩擦角 ϕ_s に比べて小さい場合、図 2.3.2 に示すように shear flow, partial plug flow, movable bed の 3 形態に分けられる。図 2.3.2 a) に示す shear flow の輸送形態は、固定床領域を砂粒子が掃流形態で移動する状態である。上述した固定床滑面水路の掃流砂量に関する検討はこの領域を主に対象としたものであり、堆積限界掃流砂量は shear flow の輸送形態で流せる最大の掃流砂量に該当する。また、図 2.3.2 b) に示す partial plug flow の輸送形態は、移動床に埋没した固定床面における砂礫の抵抗力である $\tau_0(\phi_{sb})$ が流れの底面せん断力 τ_0 よりも小さい場合、砂礫の堆積層が固定床面を滑るように移動する状態である。図 2.3.2 c) に示す movable flow の輸送形態は移動床領域のみから構成される場合を砂粒子が掃流形態で移動する状態である。

2.3.2. 固定床領域を有する場合における数値解析法と河床変動特性

(1) 固定床を流れる流砂特性を考慮した数値解析法

移動床と固定床の混在する場では、上流からの流砂量が時空間的に変動する非平衡場が形成される。このような流砂の非平衡性の数値解析法は、これまでに Struiksmas²¹⁾、旭・清水²²⁾、重枝ら²³⁾、Rulot et al.²⁴⁾、竹林ら²⁵⁾、Takebayasi et al.²⁶⁾、Luu et al.²⁷⁾ などにより検討されている。これらの方法は、いずれも固定物や難浸食性河床の上に砂礫の移動層を仮定し、移動床上の流砂量を補正することで、従来の河床変動解析の枠組みの中で固定床上の流砂の非平衡性を簡易に取り扱う方法である。

旭・清水²²⁾、重枝ら²³⁾、および Rulot et al.²⁴⁾ は、Struiksmas²¹⁾ の提案する平衡流砂量の補正関数を取り入れることで、河床位が埋没する固定床面に近づくと掃流砂量が線形的に減少することを表現している。これらのモデルでは、1 次元的な流れ場を対象とし、固定床領域の上下流域にて生じやすい移動床領域の局所洗掘をうまく再現することができることが示されている。ただし、重枝ら²³⁾ によると、Struiksmas²¹⁾ の提案する平衡流砂量の修正関数を 2 次元的な流れ場の解析にも適応し、河岸沿いに設置した置土の流出状況を実験結果と比較した結果、3 次元性の強い領域における横断方向の流砂量の評価には幾分課題が残ることを示している。

一方、竹林ら^{25), 26)} および Luu et al.²⁷⁾ は、江頭ら⁵⁾ などの平衡掃流砂層（式 (2.11)）の考え方を取り入れることで、河床面上に交換層として仮定の薄い掃流砂層を設けている（図 2.3.3）。

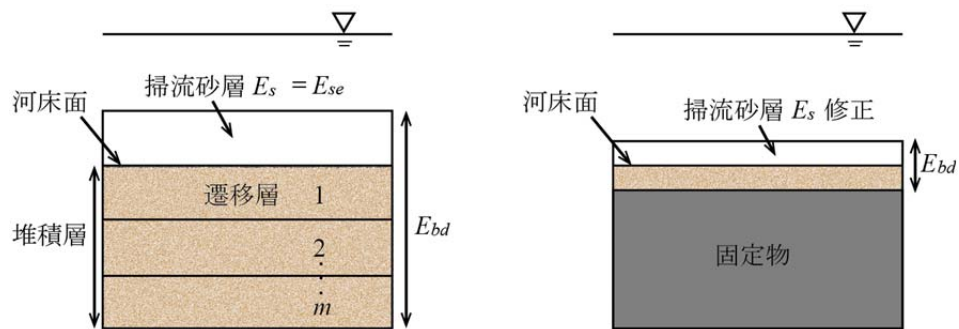


図 2.3.3 掃流砂層モデルの概念図(Luu et al.²⁷⁾ を一部改変)

$$\frac{E_{se}}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta} \frac{1}{\tan \phi_s - \tan \theta} \tau_* \quad (2.11)$$

ここに、 E_{se} は平衡掃流砂層厚さである。 \bar{c}_s ($\cong 0.52$) は、 $0 \leq z \leq E_{se}$ の領域における鉛直平均の粒子濃度、 θ は局所河床勾配である。

竹林ら^{25), 26)}の掃流砂層モデルでは、固定床領域を有する流れ場の流砂量を、河床面上の土砂の存在率 r_b を考慮して式(2.12)のように修正する。式(2.12)の掃流砂量式は、式(2.2)の芦田・道上式²⁾に河床の局所勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉²⁸⁾の平衡流砂量式であるが、土砂の存在率 r_b を用いて修正することで、固定床上に存在する土砂量が平衡掃流砂量を供給するにあたって不十分である場合、固定床領域の流砂量を線形的に減少させるものである。

$$q_b = 17 \tau_{*e}^{3/2} \sqrt{sgd^3} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{K_c} \frac{u_{*c}}{u_*}\right) r_b \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} r_b &= 1, & E_{bd} &\geq E_{se} \\ r_b &= \frac{E_{bd}}{E_{se}}, & E_{bd} &< E_{se} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここに、 K_c は河床勾配および流向の影響を考慮する係数²⁸⁾、 r_b は河床面上の土砂の存在率^{25), 26)}である。また、 τ_{*c} と u_{*c} は移動床河床における砂礫の無次元限界掃流力と限界摩擦速度であり、式(2.5)の岩垣式¹⁰⁾で評価する。 E_{bd} は掃流砂層厚さと堆積層厚さとを合わせた値である。また、 E_s は図 2.3.3 に示す掃流砂層厚さであり、式(2.14)のように求める。

$$\begin{aligned} E_s &= E_{se}, & E_{bd} &\geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1-\lambda)} \\ E_s &= E_{bd} \frac{(1-\lambda)}{\bar{c}_s}, & E_{bd} &< E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1-\lambda)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

ここに、 λ は空隙率、 \bar{c}_s は鉛直平均の粒子濃度である。

掃流砂層モデルの河床位方程式は、固定床領域を含む流れ場の場合、式(2.15)～式(2.16)のように計算する。これより掃流砂層モデルでは、河床上に平衡掃流砂量を輸送するのに十分な土砂が存在しない場合、土砂が固定床上に堆積することなく掃流砂層内のみを通過する形で下流域へと伝播することとなる。

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + (1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0, \quad E_{bd} \geq E_{se} \quad (2.15)$$

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + \sum \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0, \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0, \quad E_{bd} < E_{se} \quad (2.16)$$

ここに、 t は時間、 z_b は河床位、 q_{bx} 、 q_{by} は x 、 y 軸方向の単位幅あたりの掃流砂量である。

(2) 固定床領域を有する場における河床変動特性

河道に移動床と固定床が混在する場では、上流からの流砂が時空間的に変動する非平衡場が形成されやすい。このような流れ場の河床変動特性を検討した報告には、江頭ら¹⁴⁾、Takebayashi et al.²⁶⁾、Luu et al.²⁷⁾、武蔵ら²⁹⁾、早川ら³⁰⁾などの報告がある。

江頭ら¹⁴⁾は、固定床から移動床に変化する際の流砂条件や流れの抵抗則を理論的に導くと共に、水路実験にてその妥当性を検証している。また、Takebayashi et al.²⁶⁾は、河床面下に固定床領域が埋没する砂州河川において、河床低下が進行した場合の河床変動特性について水路実験と数値解析から検討している。その結果、河床の土砂の堆積層が薄く、固定床領域が埋没する砂州河川において固定床面が露出した場合、固定床部分では河床低下が生じないために河道全面で砂州の波高の減少と砂州の横断方向のモードが発達することを指摘している。このため、固定床領域を有する場では、河床に十分に土砂の存在する移動床河川の場合に比べて小さい幅・水深比で交互砂州と複列砂州の境界領域が出現することを示している。Luu et al.²⁷⁾は、メコン川下流域の Tan Chau reach を対象とし、難浸食性領域(粘着性土)を有する流れ場における河床変動特性について数値解析から検討している。これより、難浸食性領域を有する流れ場では、上述の Takebayashi et al.²⁶⁾と同じく河道の流路変動傾向がより強く現れることを述べている。武蔵ら²⁹⁾は、固定床領域の露出する湾曲河道に置土された土砂が流路内に輸送される場合の河床変動特性について、上述した掃流砂層モデルを用いた平面2次元河床変動解析から検討している。その結果、数値解析では置土された土砂が流路内に輸送され堆積する状況を再現できており、増水時における固定床領域の土砂の堆積厚の時間変化は、増水初期からピーク到達時よりも減水時の方が土砂の流出量が多くなることを指摘している。

早川ら³⁰⁾は、固定床蛇行水路と移動床蛇行水路における河床変動特性の違いについて、水路実験と数値解析から検討している。その結果、移動床蛇行水路では水衝部付近での洗掘が顕著になるが、固定床蛇行水路では水衝部上流域にて土砂の堆積が生じやすいことを報告している。また、固定床蛇行水路では蛇行角が大きくなるほど無次元掃流力の偏りが大きくなり、土砂が堆積しやすくなることを指摘している。

以上の報告では、移動床と固定床が混在する場において、固定床領域が次第に広がる流れ場や固定床領域に土砂が再び堆積するような流れ場の流砂特性までを考慮し、河床変動特性の検討が行われている。ただし、数値計算を利用した検討に関しては、固定床上から土砂の堆積層が失われた領域にて流し得る最大の流砂量である堆積限界掃流砂量が、同一水理条件下の移動床領域の平衡流砂量に比べてかなり大きな値をとることまでは考慮されていない。したがって、固定床領域を有する場に多量の土砂を長時間に渡って供給するような条件下では、固定床領域への土砂の堆積量が過大に評価される可能性も考えられる。

(3) 固定床領域を有する場における給砂量の変化に伴う流砂・河床変動特性

固定床領域に与える給砂量と河床変動特性との関係性に関する報告は、固定床(露岩河床など)の浸食特性に関するものが多く^{31), 32), 33)}など、給砂量を変化させることで固定床上に土砂が堆積し、移動床河床に戻るまでの流砂・河床変動特性を扱った報告は非常に少ない(Chatanantavet and Paker³⁴⁾など)。Chatanantavet and Paker³⁴⁾は、河床の粗度と河床勾配の異なる固定床水路を対象とし、給

砂量を順に増やした場合の河床変動特性について水路実験から検討している。その結果、固定床上への土砂の堆積プロセスやその被覆率は、1) 水路床の水理学的粗度、2) 給砂量、3) 河床勾配の3要因から影響を受けることを指摘している。その中でも、固定床河床の河床勾配の影響は大きく、急勾配と緩勾配では全く異なるプロセスで土砂が河床上に堆積することが示されている。彼らの報告によると、図 2.3.4 に示すとおり、平坦河床（図 2.3.6 b）の急勾配水路（ $I_b \geq 0.0115$ ）では、給砂量をゼロから固定床の飽和掃流砂量（事前実験から把握した河床全面が移動床に戻る土砂供給量）まで順に増やした場合、1) 給砂量が増えたにも関わらず固定床上に土砂の堆積が生じない状態が続き、2) 給砂量が飽和掃流砂量にほぼ一致したとき、急速に固定床が移動床に変わり河床上昇する“runaway alluviation”と呼ばれる現象が生じることが示されている。また、平坦河床の緩勾配（ $I_b = 0.003$ ）の固定床河床の場合は、図 2.3.4 に示すとおり、給砂量の増加に伴い土砂の被覆率が線形に増加し、給砂量が飽和掃流砂量とほぼ一致したときに移動床河床に戻る“gradual alluviation”が生じることが示されている。さらに、水路床の水理学的粗度が大きい（図 2.3.6 c）、あるいは固定床上に縦筋状の浸食領域が形成される（図 2.3.6 a）ような固定床領域では、給砂量が少ない間も部分的に土砂が堆積しやすいため、図 2.3.7 に示すように給砂量の増加に伴う土砂の被覆率が線形に増加しないタイプの“gradual alluviation”が生じるようである。

一方、固定床を有する場に与える給砂量と河床の浸食特性（bedrock incision）との関係性についての報告は数多く存在する^{31), 32), 33)}など。これらの報告では、固定床上に土砂の堆積域（移動床領域）が存在しない場合、1) 給砂量が増えるほど砂礫が岩床を摩耗させる浸食速度が速くなること、および、2) 給砂量がさらに増えて土砂が岩床を被覆し始めると、その被覆率が大きくなるほど岩床の浸食速度が抑制されるといった、流砂量の増加が浸食速度に対して2つの異なる役割を果たすことが明らかとされている。その中でも、井上ら³³⁾は固定床上の流砂の輸送と浸食速度を考慮した平面2次元数値解析から、同一の水理条件下で給砂量のみを変化させた場合の固定床上の河床変動と浸食特性

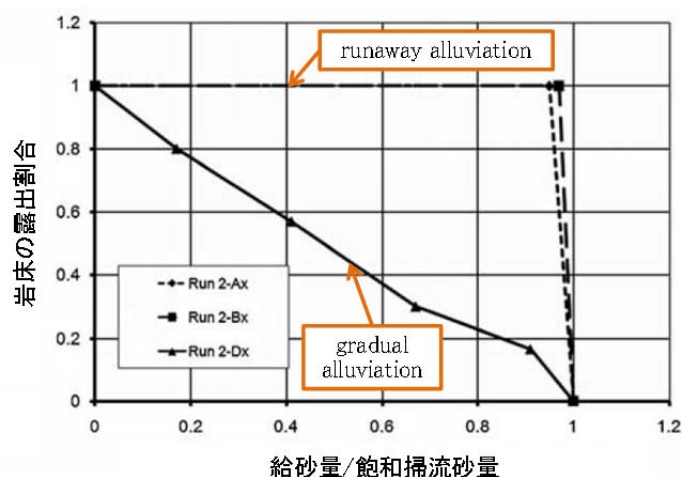


図 2.3.4 固定床水路に与える給砂量の増加に伴う露岩率の変化，図中の Run2-Ax は水路勾配 0.02， $\tau_* = 0.10$ ，Run2-Bx は水路勾配 0.015， $\tau_* = 0.087$ ，Run2-Dx は水路勾配 0.003， $\tau_* = 0.064$ の条件である。実験は図 2.3.5 b) に示す露岩河床を模した水路床（smooth bed）で実施されている（Chatanantavet and Paker³⁴⁾ を一部改編）

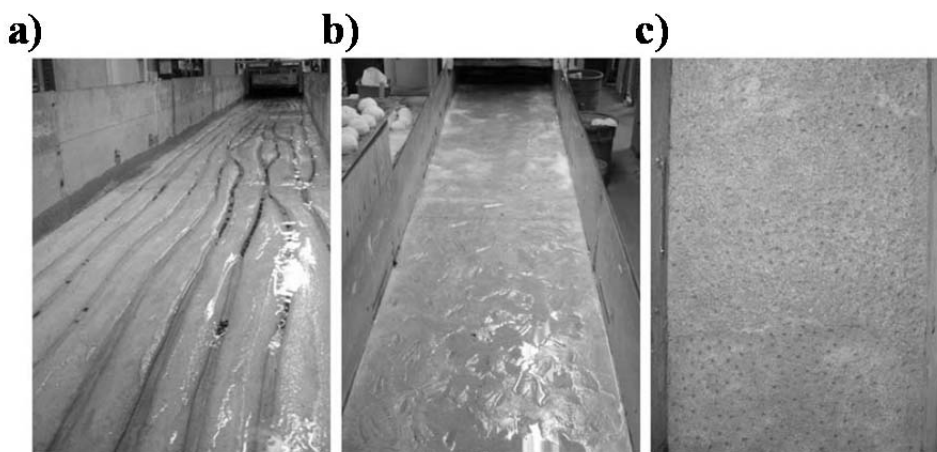


図 2.3.6 Chatanantavet and Paker³⁴⁾ の水路実験で用いられた露岩河床を模した水路床
(いずれも砂, シルト, パーミキュライトの混合物から作成されている), a) longitudinal
groove (縦筋状に浸食された河床), b) smooth bed (平坦河床), c) rough bed

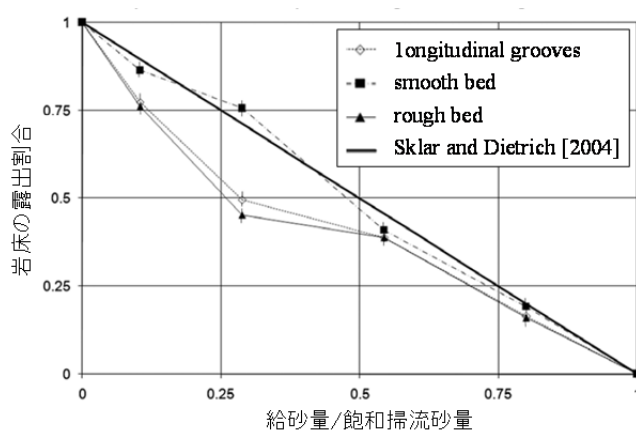


図 2.3.7 水路床タイプ(図 2.3.6)に伴う岩床の露岩率の変化の違い, 実験は全て水路勾配
0.015, 平均粒径 $d_m=2\text{mm}$, $\tau_*=0.12$ で実施されている, (Chatanantavet and Paker³⁴⁾ を一部改編)

について検討している。その結果, 固定床水路に与える給砂量が飽和掃流砂量よりも少ない場合, 固定床上の交互砂州の蛇行波長は長くなり明瞭な交互砂州が形成されなくなる, あるいは砂礫によって殆ど被覆されない状況になるため, 流砂が縦筋状に集中して流れて浸食の集中する場所が生じることを指摘している。

このように, 固定床領域を有する場に与える給砂量と河床変動特性との関係性に関する報告は幾らか存在する。しかしながら, 本研究で対象とするような固定床領域全面を移動床河床に戻すために必要となる土砂量, あるいは固定床領域の露出状況の違いに伴う流砂・河床変動特性などに関する知見は非常に限られている。

2.3.3. 結語

上述した固定床領域を有する場の流砂・河床変動特性と数値解析法について要約すると、以下のとおりである。

- (1) 固定床領域の露出した場では、移動床領域に比べて河床と砂礫の内部摩擦角が小さくなるため、砂礫の移動限界が小さくなりやすく、流砂が河床上に停止しづらくなる。このため、固定床滑面水路が流し得る最大の掃流砂量である堆積限界掃流砂量は、砂礫の粒径が大きく、水路勾配が緩やかな場ほど、同一水理条件下の移動床領域よりも大きくなることが報告されている。
- (2) 固定床領域を有する場を対象とした平面2次元の数値解析法には、固定物の上に砂礫の移動層を仮定し、固定床上の流砂量を補正することで従来の河床変動の枠組みの中で簡易に取り扱う方法が提案されている。これらのモデルでは、移動床と固定床が混在する場において、固定床領域が次第に広がる流れ場や固定床領域に土砂が再び堆積するような流れ場の流砂特性までを考慮することが可能であり、これまで幾つかの水理条件下における河床変動特性が解明されてきた。しかし、これらのモデルは、現状では固定床上から土砂の堆積層が失われた領域の堆積限界掃流砂量までは考慮されておらず、多量の土砂を長時間に渡って供給するような条件下では、固定床領域への土砂の堆積量が過大に評価される可能性も考えられる。
- (3) 固定床領域を有する場に与える給砂量と河床変動特性との関係性に関する報告は幾つか存在する。しかしながら、本研究で対象とするような固定床領域全面を移動床河床に戻すために必要となる土砂量、あるいは固定床領域の露出状況の違いに伴う流砂・河床変動特性などに関する知見は非常に限られている。

参考文献

- 1) 福岡捷二：水制工の配置と洗掘防止効果に関する研究，建設省土木研究所，1988.
- 2) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，206，pp.59-69，1972.
- 3) Meyer-Peter, E., and Muller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp.39-64, 1948.
- 4) Egashira, S. and Ashida, K.: Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, Edited by H. H. Shen et al. Elsevier, pp.391-400, 1992.
- 5) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京都大学防災研究所年報，33，B-2，pp.293-306，1990.
- 6) 江頭進治・芦田和男・田野中新・高橋徹也：連続体手法による掃流砂量式に関する研究，京都

- 大学防災研究所年報, 34, B-2, pp.261-274, 1991.
- 7) 中川博次・辻本哲郎: 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 244, pp.71-80, 1975.
 - 8) 中川博次・辻本哲郎: 砂礫の運動に伴う移動床砂面の攪乱発生過程, 土木学会論文集, 291, pp.53-62, 1979.
 - 9) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bed load motion, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 106(12), pp.2029-2051, 1980.
 - 10) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研修(I)限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 41, pp.1-21, 1956.
 - 11) Chow, V. T.: *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, p.172, 1959.
 - 12) Simons, D. B: *Theory and design of stable channels in alluvial material*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Eng. Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., U.S.A, 1957.
 - 13) 板倉雅子・池田宏: 小櫃川上流域における平滑岩盤河川の河道形状について, 筑波大学水理実験センター報告, 22, pp.9-21, 1997.
 - 14) 江頭進治・吉栖雅人・伊藤隆郭: 固定床開水路における砂礫の輸送形態と輸送能力, 水工学論文集, 40, pp.971-976, 1996.
 - 15) 土屋義人: 滑面水路床の下流端における洗掘限界, 土木学会論文集, 80, pp.18-28, 1956.
 - 16) 椿東一郎・平野宗夫・渡辺訓甫: 滑面水路における掃流機構について, 九州大学工学集報, 42(3), pp.344-352, 1969.
 - 17) Ishihara, T., Iwagaki, Y. and Sueishi, T.: On the effect of bed-load movement in thin sheet flow, *Proc. 3th Japan National Congress for Applied Mechanics*, pp.265-269, 1954.
 - 18) 嶋祐之・早川典生: 掃流砂の運動機構と流砂量について, 水理講演会論文集, 10, pp.71-76, 1966.
 - 19) 岡部健士・穴瀬康雄・山下秀基: 滑面固定床上における堆積限界掃流輸送量, 水工学論文集, 38, pp.633-640, 1994.
 - 20) 芦田和男・江頭進治・中島智彦: 水平管路における土砂輸送形態と流砂機構, 京都大学防災研究所年報, 31, B-2, pp.489-505, 1988.
 - 21) Struiksma, N.: Mathematical modelling of bedload transport over non-erodible layers, In *Proceeding of IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.89-98, 1999.
 - 22) 旭一岳・清水康行: 河床に固定物があるときの河床変動の計算, 水工学論文集, 45, pp.763-768, 2001.
 - 23) 重枝美玲・秋山壽一郎・小牧貴大・高須賀真哉: 河道への置き砂還元プロセスの平面2次元数値シミュレーション, 水工学論文集, 50, pp.1015-1020, 2006.
 - 24) Rulot, F., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Piroton, M.: Modelling sediment transport over partially non-erodible bottoms, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(2), pp.186-199, 2012.

- 25) 竹林洋史・江頭進治・金海生: 交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級, 水工学論文集, 41, pp. 895-900, 1997.
- 26) Takebayashi, H., Okabe, T. and Shinozaki Y.: Geometric Characteristics of Bars on Layers with Rocks or Cohesive Material, Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation, pp.267-277, 2007.
- 27) Luu, L. X., Egashira, S. and Takebayashi, H.: Investigation of Tan Chau Reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 48, pp.1057-1061, 2004.
- 28) 芦田和男・江頭進治・劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 35, pp.383-390, 1991.
- 29) 武蔵由育・志宇知誠・山下正浩・竹林洋史・湯城豊勝・鎌田磨人・赤松良久・川口洋一・中田泰輔: 置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用, 水工学論文集, 55, pp.817-822, 2011.
- 30) 早川博・宮本大・夏井皓盛: 屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.781-786, 2011.
- 31) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: A mechanics model for river incision into bedrock by saltating bed load, Water Resources Research, 40, W06301, 2004.
- 32) Finnegan, N. J., Sklar, L. S. and Fuller, T. K.: Interplay of sediment supply, river incision, and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel, Journal of Geographical Research, 112, F03S11, 2007.
- 33) 井上卓也・清水康行・山口里実・伊藤丹・Parker, G.: 給砂量と岩床侵食地形の関係, 水工学論文集, 58, 2014.
- 34) Chatanantavet, P. and Parker, G.: Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, Water Resources Research, 44, WR12446, 2008.

2.4. 水制に関する土砂水理学的知見

2.4.1. 水制に関する研究の概要

水制 (spur dike) とは、図 2.4.1 に示すように河岸から主流域に向けて突き出す河川構造物のことである。水制の水理的機能に関する実験的・理論的研究は、秋草ら¹⁾、Grade et al.²⁾ など、国内・国外問わず古くから行われている。これは、水制が古来より、1) 流れの導流 (training of the stream flow)、2) 河岸浸食の抑制 (protection of the stream bank from erosion)、3) 航路のための水深確保 (improvement of depth for navigation) を目的に施工されてきたため、Grade et al.²⁾ が述べるとおり土木技術者にとって、水制の配置や河床材料の違いに応じた流れ構造と河床変動特性を解明する意義が極めて大きかったためである。さらに近年においては、水制は 4) 単調化した河道内物理環境の多様性を修復する構造物 (in-stream rehabilitation structure) としても注目されはじめている。

図 2.4.2 は、水制とその類似構造物である橋脚 (abutment や pier) の水理的機能に関する既往研究をまとめたものである。図 2.4.2 より、従来の研究は、対象とする水制の構造から 1) 不透過型水制と透過型水制に大別でき、水流が水制上を越流するかによって 2) 非越流水制と越流水制とに大別できる。さらに、これらの研究は水制を平坦河床 (固定床) と移動床に設置したものに分けられる。固定床に設置された水制に関する研究は、その大半が構造物まわりの流れ構造を把握することを主な目的とするものである。一方、移動床に設置された水制に関する研究は、構造物まわりの局所洗掘の規模や形状、最大洗掘深の予測式、混合砂礫河床における洗掘孔内の河床材料の分級作用など、河床変動特性を解明することを目的とするものである。図 2.4.2 によると、水制に関する知見は数多く蓄積されているものの、固定床に設置された水制近傍の流砂動態や河床変動特性を扱った報告は非常に少ないことが分かる。とくに、固定床と移動床に水制を設置し、一様な水理条件のもとで水制近傍の流砂特性と河床変動特性の違いを比較した研究事例は佐々木ら³⁾ によるぐらいであり、ほぼ皆無に近い。

したがって、第 3 章以降で検討するように、固定床河床に水制を設置して環境修復を試みる場合、既存の移動床河床に設置された水制近傍の流砂特性や河床変動特性に関する知見がどの程度参考と

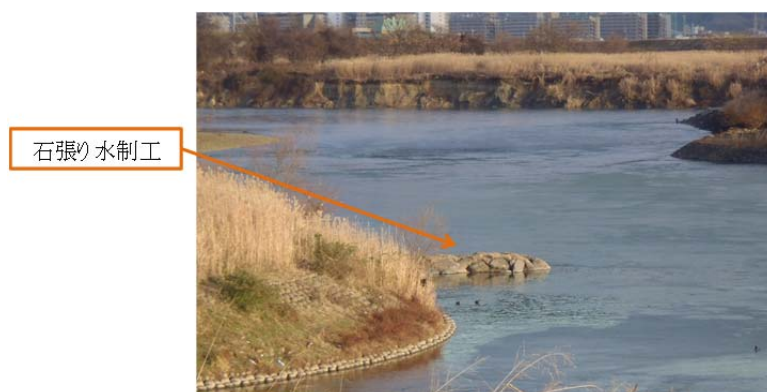


図 2.4.1 水制 (spur dike) の一例

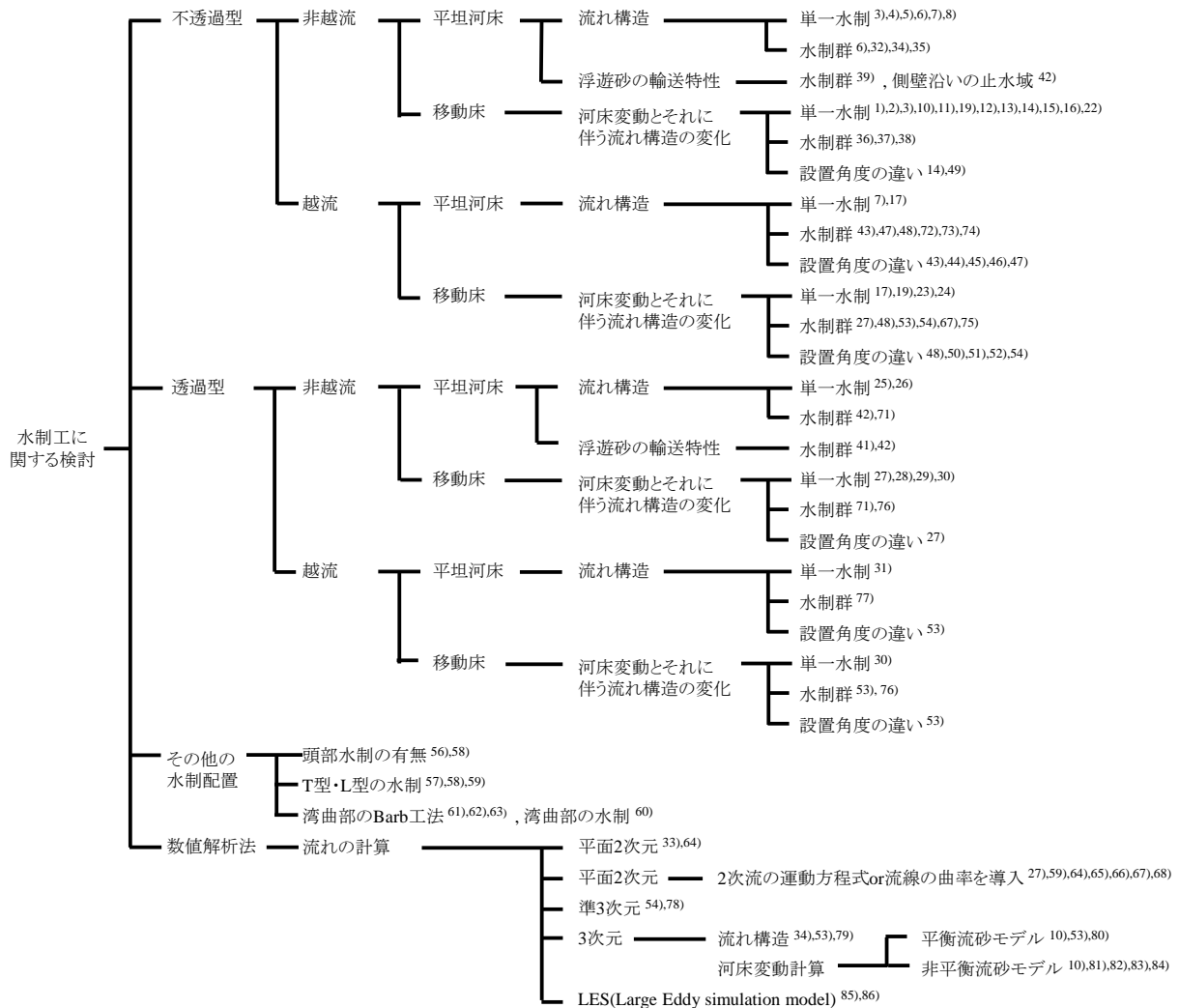


図 2.4.2 水制工に関する先行研究

なるかは不明瞭な部分が多い。そこで本節では、第3章や第5章（固定床に設置された水制近傍の流れ・河床変動特性）に先立ち、図2.4.2に示す既存の研究で既に明らかとされている移動床や固定床に設置された水制近傍の流れ、流砂、河床変動特性について概説しておく。ここでは、はじめに非越流・不透過型の単一水制についての知見を整理し、その後、水制（あるいは橋脚）の越流条件や透過条件、形状や配置、設置数などが異なる場合の水制近傍の水理的機能の変化について順に整理する。

2.4.2. 水制近傍の流れ、流砂、河床変動特性

(1) 非越流・不透過型の直角水制

平面流れ構造 (u, v)

平坦河床（固定床）上に設置された非越流・不透過型の直角水制まわりには、図2.4.3に示すような平面流れが形成される。図2.4.3に示すように、水制の先端部では流れが剥離し、対岸側に向かって主流域の流速が加速される。同時に、この水制先端部から剥離した流れの一部は水制下流域に流れ

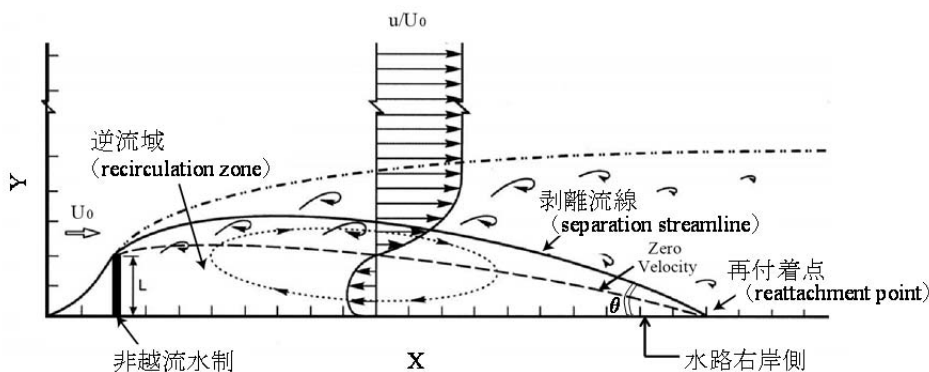


図 2.4.3 水制近傍の平面流れ構造(u, v) (Ettema and Muste⁴⁾ を一部改編)

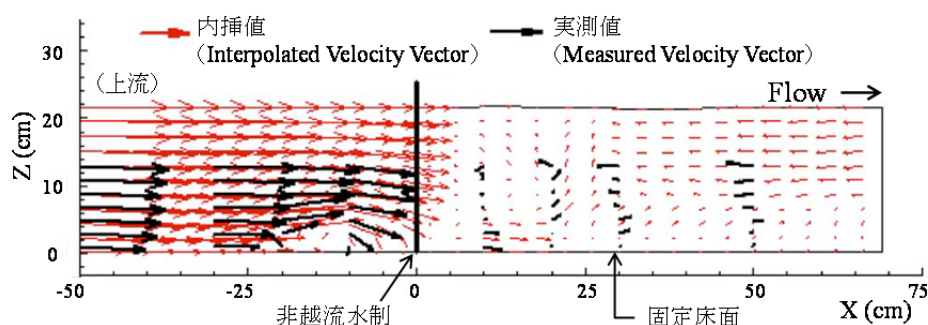
込み、鉛直方向に軸を持つ大規模水平渦を形成する。この大規模水平渦を形成する領域は逆流域 (recirculation zone) と呼ばれる。逆流域は水制下流域に向かうにつれて次第に狭くなり、ある地点で水路側壁へと再付着 (reattachment point) する。水制先端部から剥離した水平渦 (剥離渦) が再付着点までを通過する経路は剥離流線 (separation streamline) と呼ばれ、剥離流線の角度は偏倚度 θ と呼ばれる。

水制先端部から発生する剥離流線の再付着点と偏倚度 θ については、佐々木ら³⁾、Ettema and Muste⁴⁾、吉川ら⁵⁾、陳・池田⁶⁾により実験的に検討されている。Ettema and Muste⁴⁾、吉川ら⁵⁾、陳・池田⁶⁾は、いずれも剥離流線の時間平均再付着点が水制長の 14 倍程度となること、およびその距離が上流からの流入条件やフルード数の増減による影響を殆ど受けないことを示している。また、佐々木ら³⁾は剥離流線の偏倚度 θ を調べ、平坦河床上では偏倚度 θ は $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 程度の値をとること、および水路幅 B に対する水制長 L の突出距離が長いほど偏倚度 θ が急角度となることを示している。

水制下流域に形成される大規模水平渦については、陳・池田⁶⁾、水谷⁷⁾により実験的に検討されている。陳・池田⁶⁾は、電磁流速計にて非越流・不透過型の直角水制工まわりの平面流れ構造を調べ、水制先端部にて形成される水平渦 (剥離渦) は一定周期で安定して放出されること、水平渦の移動速度は水制下流域に進むにつれて変化しないこと、および水制下流域の水平渦の周期 (スケール) は渦の合体のために段階的に大きくなることを示している。水谷ら⁷⁾は、平坦河床上の水制背面の平面流れ構造を PIV 法 (表層) と電磁流速計 (底層) にて測定し、表層と底層で平面流速ベクトルの向きが一致することから、河床変動の生じない平坦河床上においては流れ構造の 3 次元性が強くないことを示している。

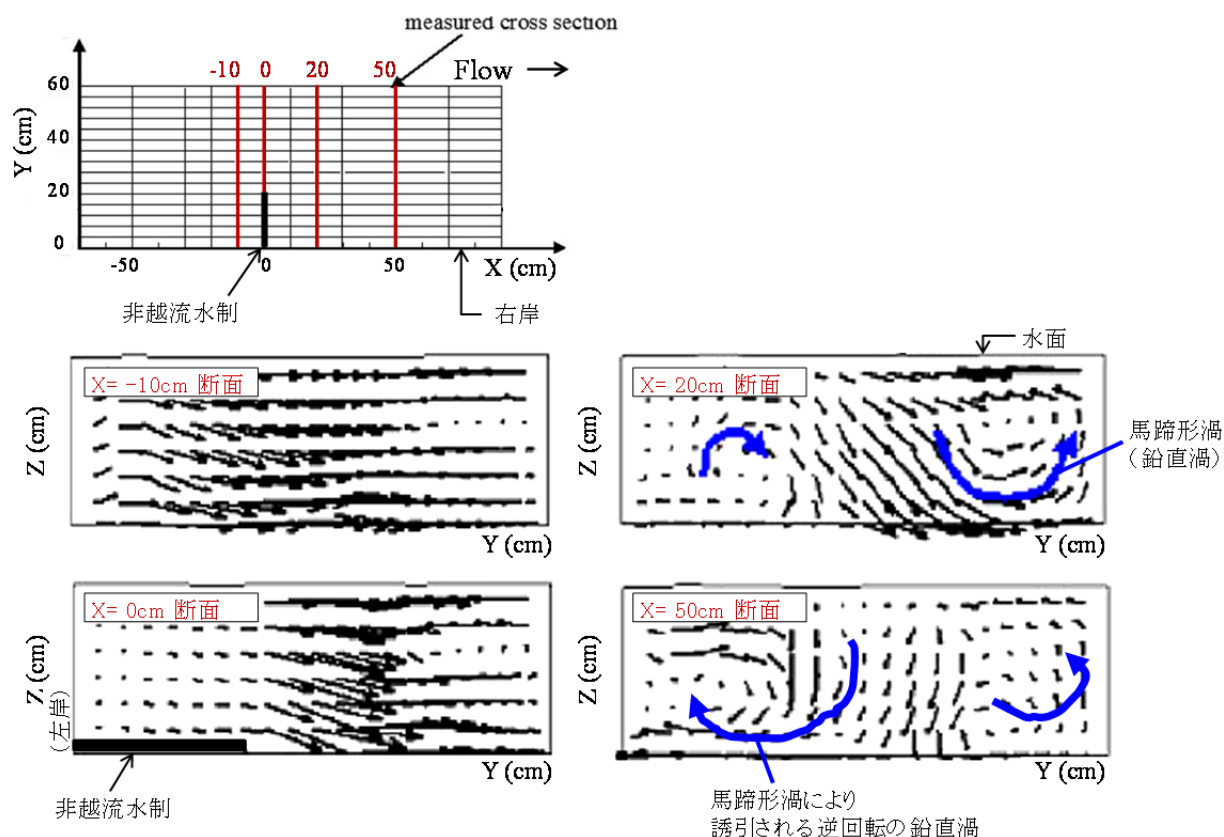
縦断面の流れ構造 (u, w)

平坦河床上に設置された非越流・不透過型の直角水制の周りには、図 2.4.4 に示すような縦断面流れが形成される^{7), 8)}。図 2.4.4 に示すように水制上流域では水流が底層へ下降流となって潜り込む。同時に、水制下流域では河床近傍から小規模な湧昇流が生じる。この湧昇流は、水制上流域にて下降流が生じることによって生じる横断面流れ (v, w) の鉛直渦 (図 2.4.5) によって誘発されるものである。この鉛直渦は、先に述べた平面流れ構造 (u, v) の大規模水平渦と異なり、後述するとおり水平方向に軸をもつ渦である。

図 2.4.4 水制近傍の縦断面流れ(u, w)構造(Duan⁸⁾を一部改編)

横断面の流れ構造 (v, w)

平坦河床上の非越流・不透過型の直角水制のまわりには、図 2.4.5 に示すような横断面流れが形成される。Duan⁸⁾ は、3次元流速計 (ADV) にて水制近傍の横断面流れ構造を調べ、水制先端部にて水流が主流域側に向かって底層に潜り込むこと (図 2.4.5 a), その後、その底層流れが水制下流域に向かうに連れて左右岸に別れることで、水制下流域に回転方向の異なる2つの鉛直渦 (縦渦) が形成されることを示している (図 2.4.5 b, 図 2.4.5 c)。この2つの鉛直渦は、水制近傍では主流域側へと回転する渦が卓越するが、水制下流域に向かうにつれて水制背面側へと回転する渦が強くなる。前者の鉛直渦は馬蹄形渦と呼ばれ、後者の鉛直渦は馬蹄形渦によって誘発される逆方向に回転する渦である。

図 2.4.5 水制近傍の横断面流れ(v, w)構造(Duan⁸⁾を一部改編)

以上のように、平坦河床上に非越流・不透過型の直角水制が設置された場合、i) 水制先端部にて流れの水切れが強く生じて主流域の水流が加速されると共に、ii) 水制下流域に鉛直方向に軸を持つ大規模水平渦を伴う流れの逆流域が形成される。また、iii) 水制下流域には水平方向に軸をもつ馬蹄形渦と、それに誘引される逆回転の鉛直渦が形成される。ただし、平坦河床の場合、水制下流域の鉛直渦の規模は小さく、流れの3次元性はそれほど強くないようである。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床に設置された非越流・不透過型の直角水制や abutment まわりでは、図 2.4.6 に示すような河床変動が生じる。これは、水制先端部において底面せん断応力 τ_* の局所的な増大が生じるため、河床材料が移動しやすくなるためである^{8), 9)}など。以下に、移動床上の水制近傍の河床変動に伴う流れ構造の変化、流砂の輸送特性、および洗掘孔の最大洗掘深を決める支配要因（水制長、水制形状、洗掘条件、河床材料）について順に整理する。なお、最大洗掘深の経験的な予測式に関する既往研究は多いが、第3章以降の検討内容と直接関わりがないため、ここでは取り上げない。

移動床上の非越流・不透過型の直角水制まわりの縦断面流れ構造は、洗掘孔の発達に伴い変化する^{1), 3), 10), 12)}。道上・檜谷¹⁰⁾は、水制まわりの洗掘に伴う流れ構造の変化を観察し、洗掘孔の発達に伴い水制直上流域にて形成される馬蹄形渦が次第に発達することを指摘している。同様に水谷ら¹¹⁾は、洗掘孔内の縦断面流れ構造を電磁流速計により詳細に調べ、水制直上流域の馬蹄形渦は平坦河床の時は弱い洗掘孔が形成されるにつれて発達すること、それに伴い水制下流域では回転方向の異なる2つの鉛直渦が発達し、図 2.4.7 のように湧昇流が明瞭に生じることなど、平坦河床の場合よりも3次元性の強い流れ場が形成されることを示している。この他、佐々木ら³⁾、秋草ら¹⁾は、水制近傍に洗掘孔が発達するにつれて水制下流域の剥離流線の偏倚度 θ の値が小さく（平均 6.6 度程度）なることを指摘している。このため、移動床上の水制下流域に形成される逆流域は、平坦河床の場合よりも縦断距離が長くなり、流速の緩やかな領域が側壁に沿ってかなり下流域まで形成されるようである。

移動床上の非越流・不透過型の直角水制まわりの流砂の輸送特性は、洗掘孔の発達に伴う流れ構造の変化の影響を受ける^{3), 10), 11)}。佐々木ら³⁾は、移動床上の水制近傍における流砂の移動方向は、前述した平坦河床（固定床）上の水制近傍の流線方向と必ずしも一致しないことを示している。道上・檜谷¹⁰⁾は、洗掘孔内で流速が速くなる場所は水制上流域の最深河床部（馬蹄形渦が発生する場所）に限られ、河床材料の pick-up もその最深河床部でのみ顕著であることを示している。同時に、この

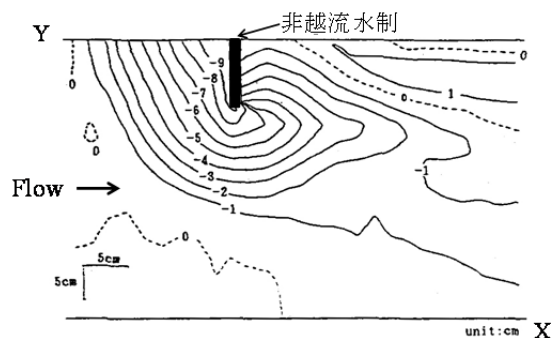


図 2.4.6 水制近傍の河床変動(道上・檜谷¹⁰⁾を一部改編)

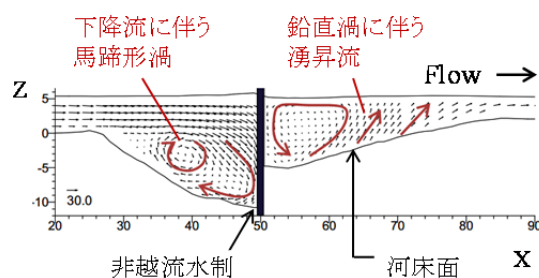


図 2.4.7 河床変動に伴う水制近傍の流れ構造の変化(水谷⁷⁾を一部改編)

pick-up された砂礫は掃流形式というよりも浮遊形式で洗掘孔内の流れに従って下流へ輸送され、ある程度洗掘が進行すると動的平衡状態の洗掘孔が形成されることを述べている。また水谷ら¹¹⁾は、水制下流域に土砂を運搬する駆動力となるのは、水制下流域に形成される2つの鉛直渦（図 2.4.5）のうち、水制背面側に回転する鉛直渦（馬蹄形渦によって誘引される渦）であることを指摘している。したがって、移動床上の非越流・不透過型の直角水制まわりの河床変動は、洗掘孔の形成に伴い発達する馬蹄形渦によって加速されると共に、洗掘孔内部の河床から pick-up された砂礫は水制下流域に形成される鉛直渦によって水制下流域へと運搬されて堆積することが分かる。

移動床上の非越流・不透過型の直角水制まわりの最大洗掘深を決める支配要因は、Grade et al.²⁾、Laursen¹²⁾、Melville^{13), 14), 15)} などにより実験的に検討されている。Grade et al.²⁾ は、水制近傍の洗掘孔について、流れのフルード数が大きく、河床材料の粒径が小さいほど最大洗掘深が深くなることを示している。一方、Laursen¹²⁾ は、構造物の形状が円柱形に近づくほど洗掘孔の最大洗掘深が浅くなることを示している。さらに Melville^{13), 14), 15)} は abutment に関する既存報告を整理し、abutment まわりの洗掘孔の最大洗掘深を決める支配要因となる物理特性は、1) 構造物長 L /水深 h の比率、2) 構造物自体のスロープの勾配、3) 河床の洗掘条件、4) 河床材料の粒径、5) 構造物の設置角度（後述）であることを指摘している。

Melville^{14), 15)} によると、洗掘孔の最大洗掘深を決める支配要因である前述の物理特性 1) ～ 3) は次のように働く。まず、1) の構造物長/水深の比率は、構造物長が水深に比べて長くなるほど洗掘孔の最大洗掘深を深くする。2) の構造物自体のスロープの勾配は、構造物の上流域側に面する側壁勾配のことであり、直角壁を有する構造物ほど洗掘孔の最大洗掘深を深くする。例えば図 2.4.8 に示すような構造物の場合、Vertical wall, Wing wall, Spill through の順に最大洗掘深が深くなる（図 2.4.9 a）。3) の河床の洗掘条件は、流れの掃流力 τ_* と河床材料の限界掃流力 τ_{*c} の比率から決まり、静的洗掘条件 ($\tau_*/\tau_{*c} < 1$, clear-water scour condition) と動的洗掘条件 ($\tau_*/\tau_{*c} \geq 1$, live-bed scour condition) の場合で洗掘孔の発達過程が異なることが報告されている。流れが静的洗掘条件の場合は（図 2.4.9 の赤矢印）、洗掘孔の最大洗掘深は河床材料の限界掃流力付近で最大値をとる。一方、動的洗掘条件の場合（図 2.4.9 の青矢印）、洗掘孔は河床波による埋戻しが生じるため、最大洗掘深が静的洗掘条件の場合よりも抑制される。ただし、さらに流れが強くなり、小規模河床形態が平坦河床の状態になると、洗掘孔は再び最大洗掘深まで到達する。

同様に、洗掘孔の最大洗掘深を決める支配要因の物理特性である 4) の河床材料の粒径は、次のように働く。まず、均一砂から構成される移動床河床の場合、洗掘孔の最大洗掘深は河床材料の平均粒

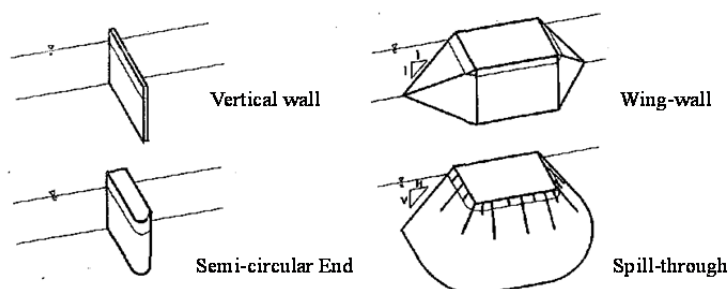


図 2.4.8 代表的な abutment, 水制工の形状 (Melville¹⁴⁾)

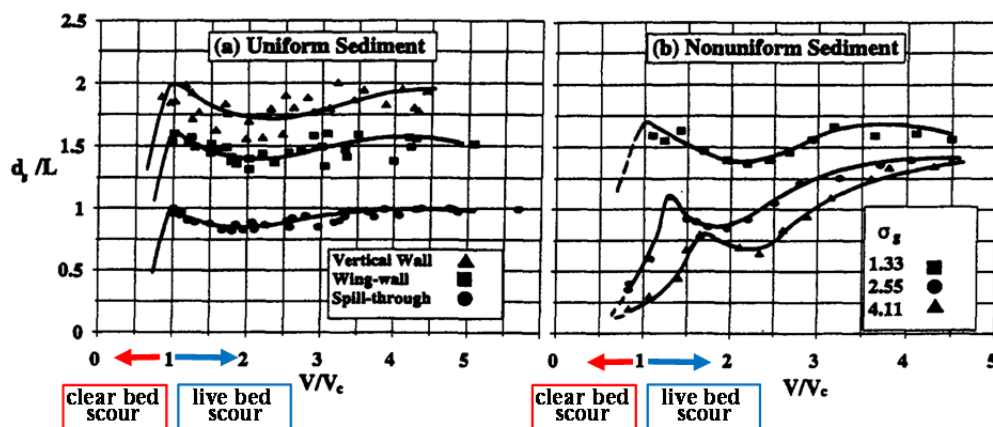


図 2.4.9 abutment 形状と水理条件に応じた洗掘孔の最大洗掘深の違い, d_s は最大洗掘深, L は構造物長, V は断面平均流速, V_c は河床材料の限界掃流力に対応する断面平均流速, σ_g は粒度分布の標準偏差を示す (Melville¹⁵⁾ を一部改編), 左図) 均一砂から構成される移動床, 右図) 混合砂から構成される移動床

径が小さいほど深くなる^{11), 14), 16)}など。一方, 混合砂から構成される移動床河床の場合, 洗掘孔の最大洗掘深は図 2.4.9 a) と図 2.4.9 b) を比較することで均一砂の場合に比べて抑制されることが分かる^{8), 11), 14)}など。これは, 混合砂礫の分級作用によって洗掘孔内にアーマリング (図 2.4.10) が形成されるためである^{8), 11)}など。また, この混合砂の移動床河床のアーマリング現象は, 河床材料の粒度分布の標準偏差 σ_g が大きいほど短時間で形成されると共に壊れにくいため, 洗掘孔の最大洗掘深を劇的に抑制することとなる^{11), 15)}など。ただし, 水流が河床のアーマリングを壊すほどに強くなる場合は, 洗掘孔の最大洗掘深は均一砂の場合の最大洗掘深の値に漸近することとなる¹⁵⁾。

以上の報告より, 移動床上に非越流・不透過型の直角水制および abutment が設置された場合, i) 水制先端部から局所洗掘が始まり, ii) 洗掘孔の発達につれて水制前面に下降流に伴う馬蹄形渦が形成され, iii) この馬蹄形渦により洗掘孔の砂が巻き上げられるため, 水制前面に最大洗掘深が形成される。一方, 水制下流域では, iv) 洗掘孔が発達するにつれて回転方向の異なる 2 つの鉛直渦が発達し, 流れの 3 次元性が強まると共に, v) この 2 つの鉛直渦のうち, 水制背面側に向かって回転する鉛直渦が水制下流域に土砂を運搬する役割を担うようである。



図 2.4.10 混合砂礫床における非越流・不透過型の水制近傍の洗掘孔と分級作用 (Duan⁸⁾)

(2) 越流・不透過型の直角水制

平面、縦断面・横断面流れ構造

平坦河床上に設置された越流・不透過型の直角水制まわりの平面・縦断面流れ構造は、図 2.4.11 に示すように、水制頂部を通過する越流水によって前述した非越流・不透過型の場合と大きく異なる。水制下流域の平面流れ構造は、越流水により大規模水平渦の発達が抑制される^{7), 17)}。同時に、水制下流域の縦断面流れ構造は、越流水による剥離渦 (separation vortex) によって流れの 3 次元性が強まることが示されている^{7), 17), 18)}。ただし、武藤ら¹⁷⁾ が述べるには、水制上部の越流水深がかなり大きくなると、水制背面の越流水に伴う剥離渦は消滅するようである。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床に設置された越流・不透過型の直角水制まわりの縦断面流れ構造は、洗掘孔の発達に伴い変化する^{17), 19), 20)}。水谷ら¹⁹⁾ は、越流・不透過型の直角水制の場合、洗掘孔が形成されるにつれて前述の非越流水制と同じく水制上流域に下降流による馬蹄形渦が発達し、馬蹄形渦が水制先端部を通過後に水制下流域に湧昇流を形成することを指摘している。また、越流水制のみの特徴として、洗掘孔が大きくなるにつれて水制頂部から生じる剥離渦が抑制されることを指摘している。

移動床上の越流・不透過型の直角水制まわりの河床変動特性は、水制長 L /水深 h の比率および相対水深比 (図 2.4.11 に示す水制高 d_s /水深 h) の大きさに強く支配される^{19), 22), 23), 24)}。この相対水深比とは、水流に対する越流水制の粗度効果の相対的な大きさを表すものである。Elawady et al.²³⁾ は、水制長が水深に比べて長くなるほど洗掘孔の最大洗掘深が深くなることを示している。また、Kuhnle et al.²²⁾ と Elawady et al.²³⁾ は、越流水制の相対水深比が大きくなる (越流水深が小さくなる) につれ、越流水による剥離渦が強まり、水制下流域に 2 次洗掘が強く引き起こされることを示している。さらに水谷ら^{19), 24)} は、相対水深比が大きくなるほど水制背面の土砂の堆積量が増大することを示している。これは、相対水深比の大きい越流水制ほど水制頂部を通過する越流水量が少なくなるため、水制が水流に与える粗度効果が大きく、馬蹄形渦が強く形成されるからである。

以上のことから、越流・不透過型の直角水制まわりの河床変動特性は、前述の非越流・不透過型の直角水制の場合に比べ、流量増加に対する応答が異なることがわかる。越流水制の場合、流量が増加して流れ場の水深が深くなるほど水制近傍の洗掘規模と最大洗掘深が抑制され、それと同時に水制下流域における土砂の堆積量も減少する。

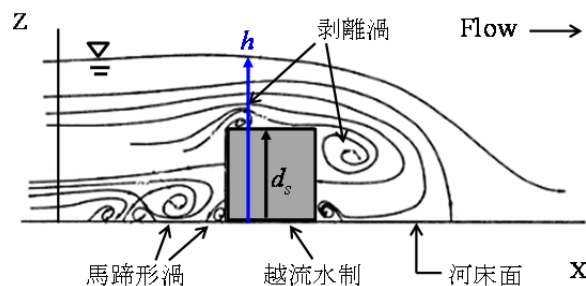


図 2.4.11 越流・不透過型の水制近傍の縦断面流れ (u, w) 構造, d_s は水制高, h は水深を示す (日本鋼構造協会²¹⁾ を一部改編)

(3) 非越流・透過型の直角水制

平面・縦断面・横断面流れ構造

平坦河床上に設置された非越流・透過型の直角水制まわりの平面・縦断面流れ構造は、水制内部を透過する水流によって、前述した非越流・不透過型の水制の場合（図 2.4.3）と大きく異なる^{25), 26)}。富永ら²⁵⁾は、水制まわりの平面流れ構造を調べ、透過型の水制下流域には大規模水平渦が殆ど形成されないことを示している。さらに道奥ら²⁶⁾は、水制まわりの縦断・横断面流れ構造を調べ、透過型の水制は不透過型のものに比べて水制近傍の水深や流速の変化が抑制されることを示している。これは、透過型の水制では水制内部を水流が透過するため、不透過型の水制に比べて水制先端部への流れの集中が軽減されるためである²⁷⁾。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床上の非越流・透過型の直角水制まわりの流れ構造は、不透過型の直角水制の場合と異なり、河床変動に伴い大きく変化しない²⁸⁾。Zhang and Nakagawa²⁸⁾は、透過型の水制近傍の縦断面流れ構造を調べ、洗掘孔が形成されても水制上流域には下降流が発達しにくく、馬蹄形渦の発達が抑制されることを示している。

さらに、移動床上の非越流・透過型の直角水制まわりの河床変動特性についても、流れ構造と同じく非越流・不透過の直角水制の場合と異なる^{27), 28), 29), 30)}。李ら²⁷⁾、Zhang and Nakagawa²⁸⁾、Nasrollahi et al.²⁹⁾、村岡ら³⁰⁾は、非越流状態の不透過型と透過型の水制近傍の洗掘孔の違いを調べ、透過型の水制は最大洗掘深の発生箇所が水制先端部よりも少し離れた下流側に偏ることことを示している。また、Nasrollahi et al.²⁹⁾は、水制まわりの洗掘規模と水制背面の土砂の堆積量を比べ、水制の透過性が高いほど河床変動量が抑制されることを示している。これは、水制内部を透過する水流が多いほど、水制の粗度効果が小さくなるためである。

(4) 越流・透過型の直角水制

平面・縦断面・横断面流れ構造

平坦河床上に設置された越流・透過型の直角水制まわりの縦断面流れ構造も、水制内部を透過する水流によって、前述した越流・不透過型の水制の場合（図 2.4.11）と大きく異なる³¹⁾。長谷川ら³¹⁾は、水制の透過性が水制頂部を通過する越流水によって生じる剥離渦に与える影響を調べ、水制の透過性が高いほど剥離渦が抑制されることを示している（長谷川ら³¹⁾の実験条件下では、水制内部の透過流速が水制上部の越流流速に比べて 87%程度の値をとる場合、剥離渦が消失している）。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床上の越流・透過型の直角水制について、河床変動に伴う流れ構造の変化を把握した検討は殆ど行われていない（図 2.4.1 に当該文献なし）。おそらく、上述の(3)で述べた非越流・透過型の直角水制と同じく、水制の透過性が高いほど洗掘孔の発達に伴う流れ構造の変化が少ないものと推察される。また同様に、移動床上の越流・透過型の直角水制まわりの河床変動特性に関する検討（村岡ら³⁰⁾）も少ない。

以上のように、直角水制が透過型の場合、i) 水制の越流条件に関わらず、水制内部を透過する水流によって水制下流域の大規模水平渦の発生が抑制される。また、ii) 水制の透過性が高くなるほど洗掘孔の形成が抑制され、同時に馬蹄形渦の発達も抑制される。さらに、iii) 水制の透過性が高いほど水制頂部を通過する越流水に伴う剥離渦も抑制される。したがって、水制の透過性が高いほど、水制近傍の流れの3次元性が弱まるようである

(5) 複数基の河道内構造物

ここでは、非越流・不透過型の直角水制群についてのみ、水制群まわりの流れ、流砂、河床変動特性を整理する。

平面、横断面流れ構造

平坦河床上に設置された複数基の非越流・不透過型の直角水制群のまわりの平面流れは、単一水制の場合と異なり、図 2.4.12 に示すようになる。水制群の場合、剥離流線 (separation stream line) の再付着点 (reattachment point) は、水制群の先端部をつなげたライン上に到達するものとして定義される。剥離流線と水制群の先端部をつなげたラインに囲まれる領域は、剥離域 (separation zone) と呼ばれる。また、水制群に囲まれた領域は水制域 (recirculating zone) と呼ばれ、水制域には水平渦に伴う逆流が形成される。水制群の水制間隔の広さは、アスペクト比 (水制間隔 D /水制長 L) を用いて相対的に表されることが多い。

池田ら³²⁾と陳・池田⁶⁾は、第1水制先端部からの剥離流線の時間平均再付着点を調べ、再付着点までの距離は水制長の4~8倍程度となり、この距離はアスペクト比が小さいほど短くなることを示している。同時に、水制域内における水平渦は、アスペクト比が小さい場合は水制域全体にわたって大規模水平渦が発達するが、アスペクト比が大きくなると水制域内に回転方向の異なる2つの水平渦が発達することを示している。池田ら³³⁾によると、水制域と主流域との質量・運動量交換率はアスペクト比2.0~3.0の水制群にて最大値をとることが指摘されている。また、米森ら³⁴⁾は、水路実験と三次元数値解析から水制群のアスペクト比が流況および抵抗特性に及ぼす影響を検討し、水制域内の渦はアスペクト比の影響により3タイプ(一渦型、二渦型、再付着型)に分けられることを示している。米森ら³⁴⁾によると、一渦型はアスペクト比2.0~4.0と小さい場合に発生する。二渦型は、アスペクト比5.0~6.0の場合に発生し、水制域内には表層から底層に向かう渦(水制域の上流側)と下

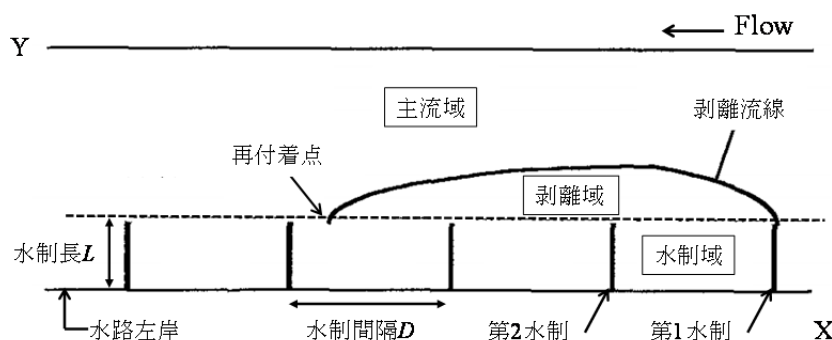


図 2.4.12 水制群近傍の平面流れ構造(池田ら³²⁾を一部改編)

流側に底層から表層へ向かう渦（水制域の下流側）が生じる。再付着型は、アスペクト比が 8.0 以上と大きい場合に発生する。再付着型では主流域の流れが水制域の壁面へと再付着するため、水制域内には主流の流れが流入し、水制域の上下流隅角部（側壁沿い）に各々循環流が形成されるようである。

一方、平坦河床に設置された複数基の非越流・不透過型の直角水制群まわりの横断面流れは、池田ら³²⁾と崇田ら³⁴⁾により実験的に検討されている。池田ら³²⁾は、アスペクト比が小さい場合は水制域の表層付近の水が主流域へと流出し、河床近傍の水が水制域側へと流入することを示している。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床に設置された複数基の非越流・不透過型の直角水制群まわりの河床変動特性は、アスペクト比の大きさに強く支配される³⁶⁾。これは、水制群のアスペクト比が小さい（水制間隔が狭い）ほど主流域に水流が集中しやすく、水制域内部の掃流力が抑制されるためである。飛山ら³⁷⁾は、交互砂州の形成される移動床上にアスペクト比の異なる非越流・不透過型の水制群を設置したところ、水制間隔が狭いほど（アスペクト比 1.0～2.0 程度）水制先端部の洗掘規模が小さくなること、交互砂州の深掘れ部が主流側に押し出されること、および水制域への土砂の堆積量が増加することを示している。

その他、非越流・不透過型の直角水制群のアスペクト比が大きくなりすぎた場合、水制域内にも河床波が侵入し始めることがある³⁶⁾。福岡ら³⁶⁾の実験では、アスペクト比の値が 20.8 よりも大きくなった場合、主流域と水制域内との流速差は小さくなり水制域内へと河床波が侵入している。結城ら³⁸⁾も、水制群の水制間隔と交互砂州の本来の蛇行波長との関係性に着目し、両者の比率によっては水制域内に土砂の堆積域が創出されず、予想に反して水制間を縫うが如き顕著な蛇行が形成されることを示している。

以上のように、移動床に設置された複数基の非越流・不透過型の直角水制では、水制近傍の流れ構造と河床変動特性は次のようにアスペクト比（水制間隔 D /水制長 L ）の大きさに強く支配される。i）水制群のアスペクト比が小さいほど、主流域の流速が加速されると共に、水制域内部の掃流力が抑制される。同時に、ii）水制群のアスペクト比が小さいほど水制先端部における洗掘規模も抑制される。一方、iii）水制群のアスペクト比が大きくなると、水制域内に主流が流れ込む横断流れが形成され、iv）さらにアスペクト比が大きくなると、水制域内へと河床波が侵入することもあるようである。

(6) 固定床上の直角水制群まわりの浮遊砂

不透過型水制

平坦河床上に設置された水制群や側岸沿いの止水域近傍の流砂特性については、浮遊砂に関する検討が幾らかある^{39), 40)}。鄭・富永³⁹⁾は、浮遊砂の輸送特性は水制の越流条件によって次のように異なることを示している。まず非越流水制の場合は、水制長 L が長く、水制域に大規模水平渦が発達するほど、図 2.4.13 a) に示すように水制域の中央部に浮遊砂の堆積が集中する。一方、水制長 L が短く、水制域内部の下流側にのみ水平渦が発達する場合は、図 2.4.13 b) に示すように水制域の上流側で浮遊砂の堆積厚が薄くなる。さらに、越流水制の場合は、図 2.4.13 c), d) に示すように水制頂部を通過する越流水によって生じる剥離渦により、浮遊砂は水制直下流と水制域の下流域側の 2 か所に分かれて堆積するようである。また、木村ら⁴⁰⁾は、側岸に長方形止水域を有する固定床水路にて浮遊砂の堆

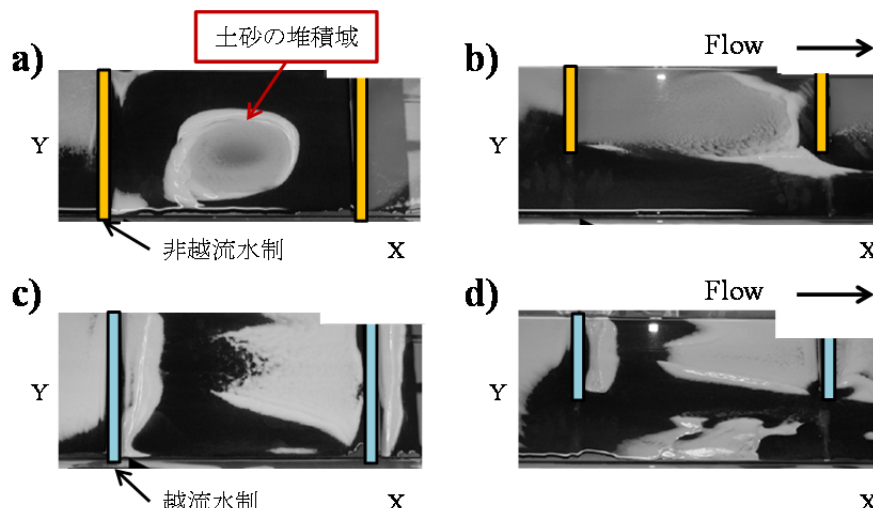


図 2.4.13 水制群近傍への浮遊砂の堆積状況(鄭・富永³⁸⁾),

a) 水制長の長い非越流水制, b) 水制長の短い非越流水制

c) 水制長の長い越流水制, d) 水制長の短い越流水制

積過程と水理パラメータとの関係性を調べ、止水域における浮遊砂の堆積形状を4つに分類すると共に、これらの堆積形状がフルード数の大きさに依存することを示している。これは、止水域内の浮遊砂の輸送・堆積に影響を与えると考えられる流れのセイシュの発生が、フルード数の大きさに大きく依存するためと推察されている。

透過型水制

平坦河床上に設置された複数基の透過型の直角水制群まわりの浮遊砂の輸送特性は、泉ら⁴¹⁾、谷・赤堀ら⁴²⁾により検討されている。泉ら⁴¹⁾は、水制域内への大量の浮遊砂の堆積は、主流域との浮遊砂濃度の差異によって水制域内への浮遊砂フラックスが増大することに起因すると述べている。谷・赤堀ら⁴²⁾は、透過型の水制群の水制域内における浮遊砂濃度は、上流側に設置された水制ほど高いために浮遊砂が河床に堆積しやすいことを示している。

(7) 水制の設置角度

平坦河床上の設置角度の異なる非越流状態の水制まわりの流れ構造に関する検討は、殆ど行われていない(図 2.4.2 に当該文献なし)。そこで、ここでは主に越流状態の不透過型の水制について、水制まわりの流れ、流砂、河床変動特性を整理する。

平面、縦断面・横断面流れ構造

平坦河床上の越流・不透過型の水制群の設置角度は、水制まわりの平面・縦断面流れ構造に強く影響する^{43), 44), 45), 46), 47)}。まず平面流れに関しては、富永・田本⁴³⁾により水制が上流側に傾くほど水制根元部へと水流が流れ込むことが報告されている。また、断面流れ構造に関しては、富永ら⁴⁴⁾が水制頂部を通過する越流水の流向が水制の設置角度に対して垂直方向へと曲げられることを示してい

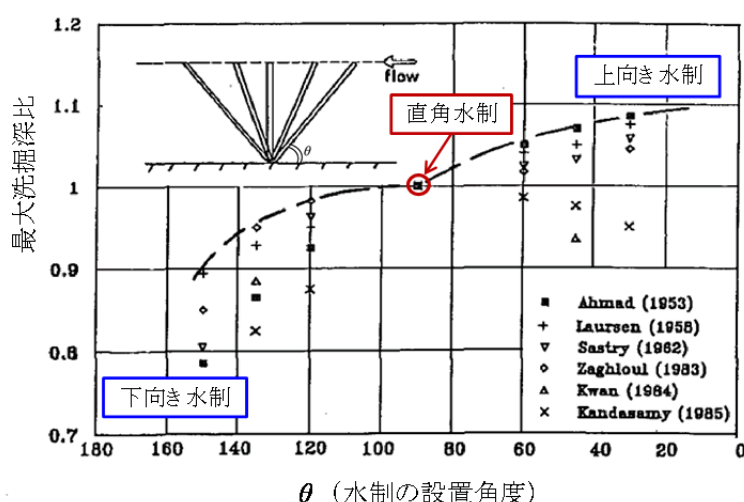


図 2.4.14 非越流・単一水制の設置角度の違いに応じた最大洗掘深比
(B. W. Melville¹⁴⁾ を一部改正)

る。また、川口ら^{45), 46)}は、水制下流域の水制域内部の平面・縦断面流れ構造を次のように報告している。直角水制の場合は、水制下流域に水制頂部を通過する越流水により生じる剥離渦が卓越する。上向き水制の場合は、水制下流域に水制先端部から流れ込む水平渦が卓越する。下向き水制の場合は、水制下流域に剥離渦と水平渦とが合わさる流れ場が形成されることを指摘している。なお、富永・井嶋⁴⁷⁾によると、上述の水制の設置角度の違いに応じた平面・縦断面流れ構造の特性は、アスペクト比が異なってもその傾向が維持されるようである。

一方、平坦河床上の越流・透過型の設置角度 ($\theta=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) の異なる水制群まわりの流れ構造は、松本ら⁴⁸⁾によると、上に述べた不透過型の水制群まわりの流れ構造と同様の特徴を示すことが報告されている。

河床変動とそれに伴う流れ構造の変化

移動床に設置された非越流・不透過型の単一水制と abutment まわりの洗掘特性は、構造物の設置角度による影響を受ける¹⁴⁾。Melville¹⁴⁾は、単一 abutment の設置角度の違いに対する洗掘孔の最大洗掘深の変化を調べ(図 2.4.14)、上向き水制ほど最大洗掘深が深く、下向き水制ほど浅くなることを示している。さらに、Cherry and Beschta⁴⁹⁾は、水制根部から水制先端部にかけて緩やかなスロープを設けた場合、水制の設置角度が同じであっても洗掘規模および最大洗掘深が抑制され、その最大洗掘深の発生箇所が主流側にずれることを示している。

一方、移動床に設置された角度の異なる越流・不透過型の単一水制は、上述した非越流・不透過型の単一水制の場合と同様の結果のものと、異なる結果のものが報告されている。Kuhnle et al.⁵⁰⁾と水谷ら⁵¹⁾は、上述した非越流水制と同様に直角水制よりも上向き水制の場合に水制近傍の洗掘規模と最大洗掘深、および水制下流域への土砂の堆積量が大きくなることを報告しているが、原田ら⁵²⁾によると、非越流水制とは逆に直角よりも上向き水制の場合に水制近傍の洗掘規模と最大洗掘深が抑制されることが報告されている。

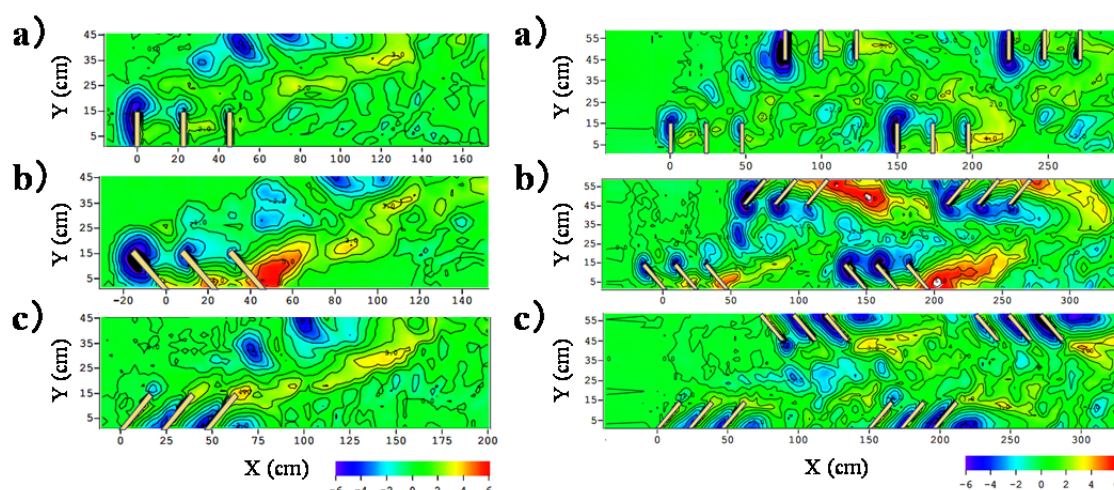


図 2.4.15 越流・不透過型水制群の設置角度の違いに応じた河床変動, a)直角水制群, b)上向き水制群, c)下向き水制群 (松本・富永⁵¹⁾)

同様に、移動床上に複数基の越流・不透過型の水制群を設置した場合についても、設置角度に応じた河床変動特性に関する報告は 2 つの結果に分かれる。まず、松本・富永⁵³⁾は、設置角度の異なるアスペクト比 1.5 の水制群を対象とした結果、水制群近傍の洗掘規模と最大洗掘深は上向き水制で最も大きく、直角水制、下向き水制の順に小さくなることを示している (図 2.4.15)。一方、福岡ら⁵⁴⁾と大本・平川⁵⁵⁾は、上述の松本・富永⁵³⁾の結果と異なり、上向き水制ほど水制近傍の洗掘規模および最大洗掘深が抑制され、同時に水制背面の土砂の堆積量も直角水制より少ないことを示している。このように、越流水制の設置角度に対する河床変動特性についてはまだ十分に知見が整理されているとは言いがたく、水制形状や水理条件 (水制上部の越流状況や水制による堰上げ背水など) が河床変動特性にかなり強く影響するものと推察される。

(8) 特殊な形状の水制

頭部水制を有する水制群

頭部水制とは、水制域と主流域との境界領域に設置される縦断方向に細長い水制である。近藤ら⁵⁶⁾によると、湾曲外岸に頭部水制を有する水制群が存在する場合、水制群が非越流状態のときは主流域の流速が加速されるために水制域に掃流砂が堆積し難いことが示されている。一方、水制群が越流状態のときは水制と頭部水制に囲まれた水制域がワンドとして働き、土砂の堆積を促進するようである。

T 型、L 型の水制

鈴木ら⁵⁷⁾は、非越流・不透過型の形状が異なる水制 (直角、T 型、L 型) まわりの洗掘特性を比較し、洗掘規模は T 型の水制で最も大きくなることを指摘している。これは、T 型水制の場合、水制上流域に直角水制よりも大きな逆流域が形成されるためである。同様に、上流側に突出する L 型の水制の場合も、T 型の水制と同じく水制前面に大きな逆流域が形成される。しかし、上流側への突出距離が長く、水制上流域に流れの淀みが形成された場合、水制近傍の洗掘規模が抑制されるようである。

また、林田ら⁵⁸⁾によると、頭部水制の役割を果たすように T 型や L 型水制を連続で配置した場合、T 型や L 型水制は直角水制に比べてワンド内の河床低下の抑制と河床形状の多様性の減少をもたらすことが報告されている。

この他、鷺見ら⁵⁹⁾は、現地河川（淀川前島地区）に設置予定されている越流（増水時のみ）・透過型の T 型および L 型水制について、水制高を異ならせた場合の水制近傍の流れと河床変動特性を平面 2 次元河床変動から検討している。鷺見ら⁵⁹⁾によると、水制高をわずか 30cm 上下に変化させるだけで、水制群に囲まれたワンド域のみでなく水制周辺の広い領域において異なる河床変動が生じることが示唆されている。また、淀川の対象地区のように自然状態で砂州の形成される場では、水制を設置することにより流速の値の空間分布の幅は大きくなるものの、水深の空間分布の幅は元の状態よりも小さくなる可能性が示されている（つまり、水制が必ずしも物理環境の多様性を向上させるとはいえないことを述べている）。同様に、武藤ら⁶⁰⁾の検討においても、T 型・L 型の水制群の検討とは異なるものの、湾曲蛇行部に越流型の水制群を設置した場合のたまり状の地形周辺の物理環境の多様性は、水制の高さによる影響がかなり大きいことが示されている。また同時に、水制の高さは一定とするよりも、砂州の比高に応じて高さを变化させた方が、たまり状地形周辺の物理環境が複雑になることを指摘している。

湾曲部に設置された Barb 工

Barb 工は、アメリカ合衆国オレゴン州にて、1980 年代から用いられてきた河岸浸食抑制法の一つである。従来の Bendway（台形で河岸から上流側に傾き、構造物長は川幅の 1/4 倍を超えない）と似た工法であるが、Barb 工は Bendway よりもスロープがなだらかで台形斜面部分がなく、水制長が長く、かつ上流側に大きく傾けて設置される構造物である。

Matsuura and Townsend⁶¹⁾は、湾曲外岸の最大洗掘深の発生個所を主流域側にずらす方法として、Barb 工を上向き 30° に傾けることが最も好ましいことを示している。また同時に、Barb 工の高さは河岸の 50% よりも低くすることを推奨している。これは、構造物の高さが低いほど、河岸近傍の洗掘深を抑制することができるためである。ただし、Barb 工の高さが減少するにつれ、洗掘孔の最大洗掘深の発生個所は水制根元部へと近づいてくることに注意する必要がある。同様に、Welch and Wright⁶²⁾も、Barb 工の実河川における成功例から、上向きに 20° ～ 30° 傾けて設置することを推奨している。また、Fox et al.⁶³⁾は、Barb 工まわりの流況および河床洗掘に関する実験を行い、洗掘形状は Barb 工先端部を中心に下流域へ広がること、Barb 工下流域には越流水に伴う 2 次洗掘が生じることを示している。

2.4.3. 数値解析による河床変動解析

水制の適切な配置は、水制近傍の流れ構造が水制配置や水理条件、あるいは河床変動の進行に応じて変化するために合理的に決めることが難しく、従来、個別の河川を対象とした水理模型実験の結果を中心にその配置が決められてきた。しかしながら、全ての個別河道にて水理模型実験を種々の水理条件下で行うことは労力・予算面の負担が大きい。そのため、数値計算を水理模型実験と組み合わせ

て水制の配置を検討することが現実的に有用な手法であると考えられている。

河床変動解析を扱う数値計算モデルは、流れの計算モデルと、流砂・河床位の計算モデルから構成される。水制まわりの流れの計算は、水深平均された流速を用いる平面 2 次元モデル、平面 2 次元モデルに鉛直方向の流速を半解析的な手法を用いて与える準 3 次元モデル、および鉛直方向の流速も運動方程式を用いて解く 3 次元モデルが検討されている。一方、水制まわりの流砂と河床変動の計算は、芦田・道上式などの平衡流砂量式を用いる平衡流砂モデルと非平衡流砂モデルが検討されている。計算精度の点から勘案すると、流れの計算に 3 次元モデル、流砂・河床変動の計算に非平衡流砂モデルを適応することが好ましいと考えられる。しかしながら、実河川への適応性と計算精度の点から各モデルを比較すると、計算時間や汎用性などの面から、現状では平面 2 次元モデルや平衡流砂モデルの利点が十分に大きいと言える。

平坦河床上に設置された非越流・不透過型の単一水制および水制群まわりの流れの構造は、平面 2 次元モデルにおいてある程度再現することが可能であることが示されている^{33), 64)}。池田ら³³⁾は、非越流・不透過型の水制群まわりの流れの計算を平面 2 次元モデルで解析し、水制域内の大規模水平渦などの特性を大局的に把握できることを示している。増田ら⁶⁴⁾は、渦動粘性項を水深平均 $k-\epsilon$ 方程式で与え、水制まわりの流れの計算を平面 2 次元モデルで TVD-MacCormack 法により解析した結果、平面 2 次元モデルでも常流と射流区間が混在する水制近傍の流れ構造を概ね再現できることを示している。さらに、崇田・清水^{65), 66)}、大槻ら⁶⁷⁾、清水・西本⁶⁸⁾は、上述の平面 2 次元モデルに Engelund⁶⁹⁾による一様湾曲部に発生する 2 次流の運動方程式、あるいは西本・清水ら⁷⁰⁾による流線の曲率モデルを取り込み、非越流・不透過型と越流・不透過型の水制まわりの 2 次流の特性を再現する方法を報告している。彼らの報告によると、これらのモデルを用いることで水制下流域に形成される 2 次流を再現し、水制下流域への土砂の堆積状況のある程度再現できることが示されている。ただし、水深平均された流速を用いるため、水制先端部のように流れの 3 次元性が特に強くなる場所における局所的な洗掘形状の再現性は悪いことが指摘されている。

以上の背景を踏まえ、本論文では第 4 章以降の数値計算において平坦河床（固定床）を対象とした流れ構造を再現するにあたっては、流線の曲率を考慮した平面 2 次元モデルを用いるものとする。これは、本研究では水制近傍の流れの渦構造のような詳細な水理特性ではなく、流向などの大局的な流れ構造を把握することを目的とするためである。ただし、平面 2 次元モデルを用いた場合、越流状態の水制に関しては水制背面の流れの 3 次元性の再現性が低いことに注意して考察する必要がある。一方、平坦河床上の流砂の輸送および河床変動特性を検討するにあたっては、固定床上の流砂特性を考慮するため、固定床上に存在する土砂濃度から流砂量を補正する掃流砂層モデル（2.3.2 節参照）を用いるものとする。

2.4.4. 結語

以上のように、水制に関する既往研究は非常に多く、平坦河床（固定床）上の水制まわりの流れ構造と浮遊砂の輸送特性、および移動床上の水制近傍の流れ構造と流砂の輸送特性、河床変動特性が明らかとされてきた。なかでも、水制の越流条件や透過性、設置数や配置、構造物自体の形状などは注

目度が高く、水路実験にて移動床領域の河床変動特性が検討されると共に、その特性を数値計算にて再現するための技術開発も活発に行われてきたことが分かる。結論をまとめると以下のようである。

- (1) 平坦河床上に設置された非越流・不透過型の単一の直角水制および水制群まわりの流れ構造は、水制背面に大規模水平渦が形成される2次元的な性質の強いものである。しかし、移動床上に同条件の水制が設置された場合、水制先端部から洗掘が始まり、水制近傍の流れ構造が変化する。洗掘孔の形成に伴い、水制上流域には下降流が発達すると共に馬蹄形渦が強く形成される。この馬蹄形渦により、水制先端部の洗掘孔の規模は拡大する。また、馬蹄形渦は水制先端部を通過する際に洗掘孔内部にて砂礫を pick-up し、その砂礫の一部が水制下流域へと運搬されて堆積する。このように、水制近傍の流れ構造は河床の洗掘の有無によって異なり、非越流・不透過型の単一の直角水制まわりの流れ構造は、洗掘孔の発達とともに3次元性が強くなることが分かる。
- (2) 平坦河床上に設置された越流・不透過型の単一の直角水制、および水制群まわりの流れ構造は、水制頂部を通過する越流水によって水制下流域に剥離渦が生じるため、3次元性の強いものとなる。移動床上に同条件の水制が設置された場合、水制近傍の洗掘孔が発達するにつれ、越流水に伴う剥離渦は抑制される。この他、水制頂部の越流水深が大きい場合も剥離渦の形成は抑制される。
- (3) 水制が透過性を有する場合、水制の越流条件や設置数に関わらず、水制内部を通過する水流によって水制上下流域における流れの3次元性が緩和される。この傾向は、移動床上の水制まわりに洗掘孔が発達しても変わらない水制近傍の河床変動量は、全般的に不透過型の水制に比べて抑制される。
- (4) 水制の設置角度は、水制近傍の流れ構造と河床変動特性に大きく影響する。非越流水制の場合、水制近傍の洗掘孔の洗掘規模と最大洗掘深は上向き水制ほど大きく、直角水制、下向き水制と抑制される。一方、越流水制の場合、水制角度に応じた洗掘状況は上向き水制ほど洗掘規模や最大洗掘深が大きくなる場合と、反対に上向き水制ほど洗掘が抑制される場合が存在する。この理由に関する知見は現状では不十分であるが、おそらく水理条件や水制形状による影響を強く受けるものと推察される。
- (5) 水制近傍の流れ構造と河床変動特性を再現するための数値計算は、流れの計算モデルと、流砂・河床変動の計算モデルから構成される。第4章以降の検討では、数値計算で固定床上の水制近傍の流れ構造を評価するにあたって、流線の曲率を考慮した平面2次元モデルを用いるものとする。また、固定床上の水制近傍の流砂特性と河床変動特性を評価するにあたっては、固定床領域の流砂特性を再現できるようにした掃流砂層モデルを用いるものとする。

2.5. 結 論

本章では、第3章以降の検討に先立ち、1) 中小河川の概要を把握すると共に、従来の研究のレビューとして、2) 固定床河川における既往の環境修復事例と課題、3) 固定床領域を有する場の流砂・河床変動特性と数値解析法、4) 環境修復技術の一つとして注目される水制に関する土砂水理学的知見について整理した。これらの内容を結論は各節末の結語にて述べたが、要約すると以下のようである。

- (1) 今日、全国各地で良好な景観や多様な水生生物の生息する河川環境を取り戻すための川づくりが求められている。しかし、現状では環境に配慮した河道計画に関する技術指針は移動床河川に対するものに限られ、固定床化の進行する露岩河川やコンクリート三面張り河川のような中小河川を対象とした環境修復に関する技術指針は皆無に近い。
- (2) 固定床領域を有する河川における環境修復事例には、置土や連結玉石の設置、コンクリート製河床の除去などの手法を用いたものが幾らか存在する。これらは河道内に深みや局所的な土砂の堆積域を創出することで、サケ科魚類や底生魚類の生息数の増加に寄与することが報告されている。しかし、これらの報告はあくまで環境修復事業の実施前後における生物相のモニタリング調査からその効果を評価したものであり、各河川の水利条件の違いを考慮したうえでの環境修復技術の一般化にまで踏み込めていない。
- (3) 固定床領域を有する場を対象とした平面2次元の数値解析法には、固定物の上に砂礫の移動層を仮定し、固定床上の流砂量を補正することで従来の河床変動の枠組みの中で簡易に取り扱う方法が提案されている。これらのモデルでは、固定床と移動床が混在する場において、固定床領域が次第に広がる流れ場や固定床領域に土砂が再び堆積するような流れ場の流砂特性までを考慮することが可能であり、これまで幾つかの水利条件下における河床変動特性が解明されてきた。しかし、これらのモデルは、現状では固定床が完全に露出した領域の堆積限界掃流砂量までは考慮されておらず、多量の土砂を長時間に渡って供給するような条件下では、固定床領域への土砂の堆積量が過大に評価される可能性も考えられる。
- (4) 水制に関する知見は、平坦河床（固定床）と移動床領域に設置された水制近傍の流れ構造の違いについてはある程度の知見が存在する。たとえば、平坦河床上に設置された非越流・不透過型の単一の直角水制および水制群まわりの流れ構造は、水制背面に大規模水平渦が形成される2次元的な性質の強いものである。一方、移動床上に設置された非越流・不透過型の単一の直角水制および水制群まわりの流れ構造は、洗掘孔の発達とともに3次元性が強くなること等が報告されている。しかしながら、固定床に設置された水制まわりの土砂動態や河床変動特性を扱った報告は非常に少ない。したがって、固定床河床に水制を設置して環境修復を試みる場合、既存の移動床河床に設置された水制近傍の流砂特性や河床変動特性に関する知見がどの程度参考となるかは不明瞭な部分が多い。

参考文献

- 1) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦: 水制に関する研究, 建設省土木研究所報告, 107, pp.61-135, 1960.
- 2) Grade, R. J., Subramanya, K. and Nambudripad, K. D.: Study of scour around spur-dikes, Journal of the Hydraulics Division, 87(HY6), pp.23-37, 1961.
- 3) 佐々木八郎・吉田俊彌・草間孝志: 水制に関する一実験: 特に水制がその下流域の流速, 水深に及ぼす影響について, 信州大学工学部紀要, 5, pp.137-150, 1956.
- 4) Ettema, R. and Muste, M.: Scale of Effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130(7), pp.635-646, 2004.
- 5) 吉川秀夫・杉本昭典・芦田和男: 水制に関する研究(1), 土木研究所報告, 90, 1955.
- 6) 陳飛勇・池田駿介: 水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究, 水工論文集, 40, pp.787-792, 1996.
- 7) 水谷英朗: 混合砂河床を用いた水制周辺の局所洗掘に関する実験, 京都大学大学院工学研究科博士学位論文, p.57, 2011.
- 8) Duan, J. D.: Mean flow and turbulence around laboratory spur dike, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 135(10), pp.803-811, 2009.
- 9) Nwachukwu, N. and Rajaratnam, B. A.: Flow near groin-like structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), pp.463-480, 1983.
- 10) 道上正規・檜谷治: 水制周辺の平面 2 次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 36, pp.61-66, 1992.
- 11) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩: 非越流・不透過型水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.829-834, 2011.
- 12) Lausen, E. M.: Scour at bridge crossing, Transactions of the American Society of Civil Engineers, ASCE, 127(1), pp.166-179, 1962.
- 13) Melville, B. W. and Sutherland, A. J.: Design method for local scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), pp.1210-1226, 1988.
- 14) Melville, B. W.: Local scour at bridge abutments, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(4), pp.615-631, 1992.
- 15) Melville, B. W.: Pier and abutment scour integrated approach, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), pp.125-136, 1997.
- 16) Zhang, H., Nakagawa, H. and Mizutani H.: Bed morphology and grain size characteristics around a spur dyke, International Journal of Sediment Research, 27(2), pp.141-157, 2012.
- 17) 武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川一: ADCP を用いた水制域における流速分布計測, 水工学論文集, 49, pp.637-642, 2005.
- 18) Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O.: Experimental study of flow behavior around

- submerged spur-dike on rigid bed, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 44, pp.539-544, 2000.
- 19) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩: 水制周辺の河床変化および砂の分級現象, 京都大学防災研究所年報, 54B, pp.525-536, 2011.
 - 20) 藤田一郎・武藤裕則・嶋津良郎・椿涼太・綾史郎: LSPIV 法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関する検討, 水工学論文集, 47, pp.943-948, 2003.
 - 21) 日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学, 東京, 東京電機大学出版局, p.66, 1997.
 - 22) Khunle, R. A., Alonso, C. V. and Shields Jr. F. D.: Geometry of scour holes associated with 90° spur dikes, Journal of Hydraulic Engineering, 125(9), pp.972-978., 1999.
 - 23) Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O.: Movable bed scour around submerged spur-dikes, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 45, pp.373-378, 2001.
 - 24) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩: 相対水制高が水制周辺の局所洗掘と粒度変化に与える影響, 水工学論文集, 56, pp.1141-1146, 2012.
 - 25) 富永晃宏・長尾正志・長坂剛: 水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, 水工学論文集, 44, pp.1035-1040, 2000.
 - 26) 道奥康治・石垣泰輔・前野詩朗・南條雅志・池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 48, pp.799-804, 2004.
 - 27) 李最森・道奥康治・前野詩朗・和中隆志: 捨石透過水制を配した開水路における流れと河床変動, 水工学論文集, 51, pp.817-822, 2007.
 - 28) Nakagawa, H. and Zhang, H.: Characteristics of local flow and bed deformation at impermeable and permeable spur dykes, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 53, pp.145-150, 2009.
 - 29) Nasrollahi, A., Ghodsian, M. and S. Neyshabouri, S. A. A.: Local scour at permeable spur dikes, Journal of Applied Sciences, 8, pp.3398-3406, 2008.
 - 30) 村岡一志・森本稔・門田章宏・鈴木幸一: 石かご水制下流域の河床形状変化に関する研究, 水工学論文集, 52, pp.631-636, 2008.
 - 31) 長谷川和義・柿崎恒美・三井和久: 透過水制における透過流量と抵抗特性, 水工学論文集, 34, 343-348, 1990.
 - 32) 池田駿介・吉池智明・杉本高: 不透過水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 43, pp.281-286, 1999.
 - 33) 池田駿介・杉本高・吉池智明: 不透過水制群を有する流れの水理特性に関する研究, 土木学会論文集, 656Ⅱ-52, pp.145-155, 2000.
 - 34) 米森一貴・木村一郎・清水康行: 非越流連続水制のアスペクト比が水深および三次元流況に及ぼす影響, 水工学論文集, 70, pp.673-678, 2014.
 - 35) 崇田徳彦・渡邊康玄・清水康行: 水制周辺の流速分布について, 水工学論文集, 39, pp.577-582, 1995.
 - 36) 福岡捷二・川口広司・安竹悠・春名聡誌: 複断面直線水路に設置された不透過型水制群の機能と

- 抵抗, 水工学論文集, 46, pp.481-486, 2002.
- 37) 飛山裕之・黒木幹男・板倉忠興: 移動床河道における水制の効果に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 48, II-14, pp.379-384, 1992.
- 38) 結城朝恭・佐々木八郎・吉田俊彌・草間孝志: 蛇行と水制に関する一実験, 信州大学工学部研究報告, 3, pp.91-115, 1954.
- 39) 鄭載勲・富永晃宏: 高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造, 水工学論文集, 53, pp.913-918, 2009.
- 40) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄: 止水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, 水工学論文集, 42, pp.1057-1062, 1998.
- 41) 泉典洋・池田駿介・Parker, G: 透過水制を有する直線砂床河床の平行横断面形状, 土木学会論文集, 565, II-39, pp.31-41, 1997.
- 42) 谷祖鵬・赤堀良介・池田駿介: 水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究, 混相流, 23, pp.615-652, 2010.
- 43) 富永晃宏・田本典秀: 越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 48, pp.805-810, 2004.
- 44) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎: 斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析, 水工学論文集, 45, pp.379-384, 2001.
- 45) 川口広司・岡信昌利・福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 44, pp.1065-1070, 2000.
- 46) 川口広司・渡邊明英・福岡捷二: 異なる角度の越流型水制周辺流れの二次元数値解析, 水工学論文集, 45, pp.385-390, 2001.
- 47) 富永晃宏・井嶋康二: 越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果, 水工学論文集, 46, pp.475-480, 2002.
- 48) 松本大三・富永晃宏・石川光雄: 越流水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 52, pp.637-642, 2008.
- 49) Cherry, J. and Beschta, R. L.: Coarse woody debris and channel morphology: a flume study, Water Resources Bulletin, 25(5), pp.1031-1034, 1989.
- 50) Khunle, R. A., Alonso C. V. and Shields Jr. F. D.: Local scour associated with angle spur dikes, Journal of Hydraulic Engineering, 128(12), pp.1087-1093., 2002.
- 51) 水谷英朗・中川一・川池健司・張浩・Quentine, L.: 設置角度の異なる単独水制周辺の粒度分布変化に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 56, pp.485-495, 2013.
- 52) 原田守啓・高岡広樹・大石哲也・萱場祐一・藤田裕一郎: 設置角度の異なる越流型上向き水制の河床変動特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 69, pp.1189-1194, 2013.
- 53) 松本大三・富永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 50, pp.1009-1014, 2006.
- 54) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 42, pp.997-1002, 1998.

- 55) 大本照憲・平川隆一・渡邊訓甫: 非越流型水制群の向きが河床変動と流れ構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, 8, pp.875-882, 2005.
- 56) 近藤晴紀・武藤裕則・石垣泰輔: わんどにおける頭部水制の機能に関する実験的研究, 水工学論文集, 54, pp.943-948, 2010.
- 57) 鈴木幸一・門田章宏・重松和恵・田中健治: T型・L型水制に起因する河床形状変化特性, 水工学論文集, 54, pp.817-822, 2010.
- 58) 林田大樹・田添慧・武藤裕則・田村隆雄: 水制の頭部形状がわんど内の水理に与える影響, 水工学論文集, 58, pp.1081-1086, 2014.
- 59) 鷺見崇・竹林洋史・佐久間維美・森川一郎・長谷川稔・伊藤嘉奈子・山本誠二・柴田研: 砂州河川における土砂の堆積抑制を目的としたT型・L型水制の設置と物理環境の変化, 水工学論文集, 57, pp.1183-1188, 2013.
- 60) 武藤裕則・中川一: 水制の形状が砂州地形の攪乱に及ぼす影響に関する実験的検討, 水工学論文集, 50, pp.847-852, 2006
- 61) Matsuura, T. and Townsend, R.: Stream-barb installations for narrow channel bends — a laboratory study, Canadian Journal of Civil Engineering, 31(3), pp.478-486, 2004.
- 62) Welch, S. and S. Wright, P. E.: Design of stream barb, Natural Resources Conservation Service, Technical Note23, pp.1-25, 2005.
- 63) Fox J. F., Papanicolaou A. N., Hobbs B., Kramer C. and Kjos, L.: Fluid-sediment dynamics around a barb: an experimental case study of a hydraulic structure for the Pacific Northwest, Canadian Journal of Civil Engineering, 32(5), pp.853-867, 2005.
- 64) 増田尚弥・田中祐一郎・中谷剛: 水制工周辺に射流域を生じる流れの数値計算に関する研究, 水工学論文集, 39, pp.551-556, 1995.
- 65) 崇田徳彦・清水康行: 水制を含む流れの準3次元数値計算モデルの開発, 土木学会論文集, 497, II-28, pp.31-39, 1994.
- 66) 崇田徳彦・清水康行: Reynolds 応力を考慮した水制を含む流れの計算, 水工学論文集, 37, pp.487-493, 1993.
- 67) 大槻英樹・芦田和男・阿部宗平・和田浩・藤田暁: 水制による流れの制御と護岸・護床機能の予測手法, 土木学会論文集, 663, II-53, pp.11-30, 2000.
- 68) 清水康行・西本直史: 水制による河床変化の数値計算, 北海道開発局開発土木研究所河川研究室, pp.87-111, 1993.
- 69) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Journal of Hydraulic Division, ASCE, 100, HY11, pp.1631-1649, 1974.
- 70) 西本直史・清水康行・青木敬三: 流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, 456, II-21, pp.11-20, 1992.
- 71) Teraguchi, H., Nakagawa, H., Muto, Y., BABA, Y. and Zhang, H.: Effects of groin on the flow and bed deformation in non-submerged conditions, Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 51B, pp.625-631, 2008.

-
- 72) 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛: 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, 3, pp.805-812, 2000.
- 73) 今本博健・池野秀嗣: 水制の水理機能に関する研究, 京大防災研究所年報, 17B, pp.1-19, 1974.
- 74) 富永晃宏・中野義郎・藤田享良: 越流水制域内の流れ構造の可視化解析, 水工学論文集, 44, pp.1041-1046, 2000.
- 75) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・鈴木鉄兵: 越流型連続水制のアスペクト比の変化が河床形状および水理特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 49, pp.769-774, 2005.
- 76) 福岡捷二・渡邊明英・川口広司・安竹悠: 透過型水制工が設置された直線水路における流れと河床変動, 水工学論文集, 44, pp.1047-1052, 2000.
- 77) 松本大三・富永晃宏・石川光雄: 越流水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 52, pp.637-6428, 2008.
- 78) 福岡捷二・渡邊明英・西村達也: 水制工の適切な配置決定のための三次元モデルの開発, 水工学論文集, 34, pp.337-342, 1990.
- 79) 川口広司・福岡捷二・渡邊明英: 設置角度の異なる越流水制周辺の流れと流体力分布特性, 水工学論文集, 48, pp.811-816, 2004.
- 80) Zhang, H., Nakagawa, H., Ishigaki, T., Muto, Y. and Baba, Y.: Three-dimensional mathematical modeling of local scour, *Journal of Applied Mechanics*, 8, pp.803-812, 2005.
- 81) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, 684 II-56, pp.21-34, 2001.
- 82) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y.: Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 131, pp.1074-1087, 2005.
- 83) 音田慎一郎・細田尚・木村一郎・岩田道明: 平衡・非平衡流砂モデルによる水制周辺の局所洗掘に関する数値解析, 水工学論文集, 51, pp.943-948, 2007.
- 84) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩: 混合砂礫床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 54, pp.805-810, 2010.
- 85) Zhou, Y., Michiue, M. and Hinokidani, O.: A numerical method of 3-D flow around submerged spur-dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 44, pp.605-610, 2000.
- 86) 赤堀良介・道奥康治: 非ダルシー型抵抗則を用いた捨石水制内部流れおよび3次元LESによる水制周辺流れの数値解析, 水工学論文集, 52, pp.1045-1050, 2008.
-

第3章 固定床領域を有する河川における環境修復 の試みと課題

3.1. 概 説

市街地や農村地域を流れる中小河川では、近年、全国各地に河床から土砂の堆積層が消失した露岩河川やコンクリート三面張り河川が認められる。こうした固定床領域を有する河川では、河道内物理環境の単調化が引き起こす水圏生態系の貧弱化が懸念されており^{1), 2), 3)}など、近年になり、多様な生物が生息できる河川環境を確保することが求められつつある。実際、固定床河川を対象とした環境修復は各地で既に幾つか実施されており、これらの既存事例ではコンクリート製河床の撤去や流路拡幅⁴⁾、水制施工^{5), 6), 7)}や置土^{8), 9)}を実施し、河道上に土砂の堆積域を創出することで魚類などの水生動物群集の生息状況がある程度改善することが報告されている。しかし、これらの報告はいずれも個別の固定床河川の環境修復事業前後の地形変化に対する水生動物群集の生息状況を比較し、その改善度合いを評価したもので、固定床河川の水利特性や流砂特性までを含めた評価は行われていない。したがって、これらの手法をそのまま水利条件の異なる別地域の固定床河川へと適応した場合、既往研究と同等程度の環境修復効果が常に得られるとは限らない。

なかでも、市街地周辺を流れるコンクリート三面張り河川は、流路の直線化に伴う河床勾配の急勾配化や、ため池を起点とするために上流から十分な土砂供給を見込めないものが多く、河道内に自然と土砂が堆積することで時間経過と共に河道内物理環境が改善することを殆ど期待できない状況にある。また、コンクリート三面張り河川はその大半が堤防上や堤防近くまで土地利用されているため、社会的制約から堤外地を拡幅して掃流力を抑制し、砂州（蛇行流路）の形成を促すような河道内物理環境の改善を行うことも難しい。そのため、これらのコンクリート三面張り河川を対象に「治水・利水・環境」を満足する川づくりを実現するには、現状の河道形状を変えずに上流からの少ない土砂を有効利用できるような環境修復の方法を検討する必要がある。しかしながら、現状では露岩河床やコンクリート製河床のような固定床上の流砂特性については十分な知見が得られておらず^{10), 11)}、事業実施後の河床変動を予測することは難しい。さらに、コンクリート三面張り河川に生息する魚類や底生動物といった水生動物群集の生息状況や分布様式に関する知見も少なく^{3), 12)}、環境修復を行うにあたって、どのような物理環境を固定床上に創出する必要があるかについても殆ど分かっていない。

このような背景から、本章では第5章（固定床領域に設置された水制近傍の流砂・河床変動特性）の検討に先立ち、兵庫県三田市内を流れるコンクリート三面張りの武庫川水系池尻川を対象とし、1) 底生動物の生息状況の把握した後、2) 一般的な形状である不透過型の直角水制工群を利用した環境修復の試みを実施し、その効果と課題について確認した。

本章の構成は以下のとおりである。まず、3.2 節では、本検討で対象とする池尻川について概説する。次いで、3.3 節では池尻川における事前調査として、微少な河道内物理環境の違いが底生動物群

集の生息状況に及ぼす影響を把握する。これより、池尻川において底生動物の生息場所を改善させるうえで必要な物理環境を把握し、環境修復の目標を設定する。最後に、3.4 節では池尻川の中流域に小規模な直角水制群を設置し、その後のモニタリング調査から水制施工後の物理環境と底生動物の生息状況の変化について把握すると共に、その課題について確認する。なお、池尻川に設置した直角水制群は、上流から輸送される土砂を側壁沿いに捕捉し、植生繁茂を促すことで、治水機能にかかわる河積をできる限り損なわずに底生動物の生息場所を創出させることを期待するものである。ただし、固定床河川に適する水制配置に関する技術的知見は存在しないため、池尻川の水制配置は移動床河川に適する水制工の設計基準¹³⁾を参考に決定した。

3.2. 調査地の概要

本研究は、兵庫県三田市内を流れる武庫川水系池尻川を対象とした。池尻川は全長 2.8km 程度の小

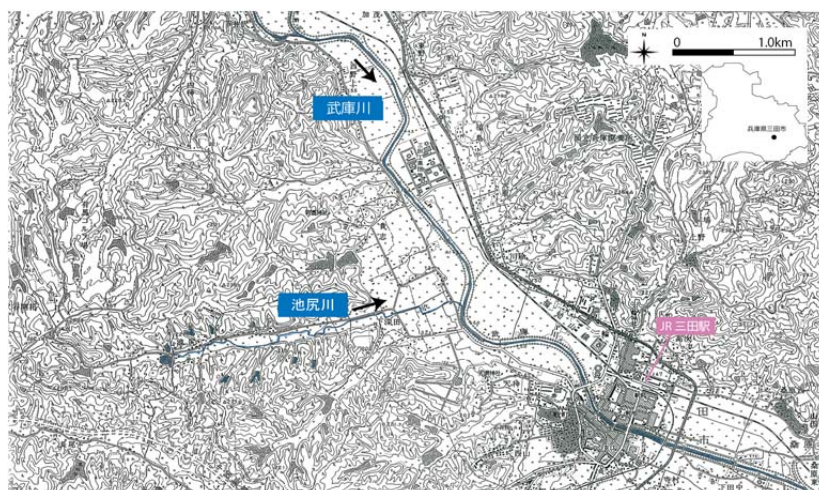


図 3.2.1 改修前の池尻川と周辺の土地利用(昭和 50 年)

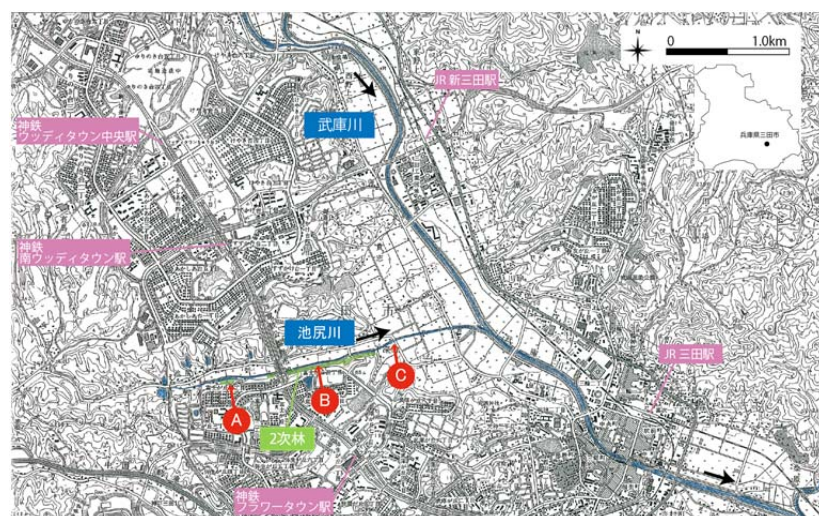


図 3.2.2 改修後の池尻川と周辺の土地利用(平成 11 年)

規模な二級河川であり、河床と側壁をコンクリート材で覆われた典型的なコンクリート三面張り河川である。池尻川は森林に囲まれた丘陵地に端を発し、一度溜池に貯留した水がコンクリート製の流路のみを経て武庫川本川へと流入する。

図 3.2.1 および図 3.2.2 に、池尻川の河川改修前後における土地利用の変化を示す。図 3.2.1 より、改修前の池尻川は山間部を縫うように流れる小さな蛇行河川であったことが分かる。また、ヒアリング調査¹⁴⁾によると、改修前の池尻川は川幅約 1.0m、平水時の水深が数 10cm 程度で、河岸に植生が生え、初夏になるとゲンジボタル成虫が多数飛翔するような比較的自然的豊かな河川であったようである。しかしその反面、大出水時には民家が浸水するなど、治水面には幾分課題があったようである。

池尻川の河川改修は 1980 年代、北摂三田ニュータウンの開発に伴い市街地内の流下能力を向上させるために行われた。これより、図 3.2.2 に示すように池尻川の流路は直線化され、川幅 3.0～6.0m、側壁高 3.0m の台形断面を有するコンクリート三面張り河川に改修された（写真 3.2.1）。改修後の池尻川は、平水時の平均水深が 1cm～3cm 程度と極めて浅く、降雨時は平均水深が 15cm 程度であっても河道全面に流速 2.0m/s を超すような速い流れが形成される（図 3.2.3）。

池尻川の間平均河床勾配は、図 3.2.2 に示す上流域から順に（A～C 地点）約 1/100、1/50、1/60 と比



写真 3.2.1 池尻川の平水時と増水時の様子、左)平水時、右)増水時（図 3.2.2 の B 地点付近）

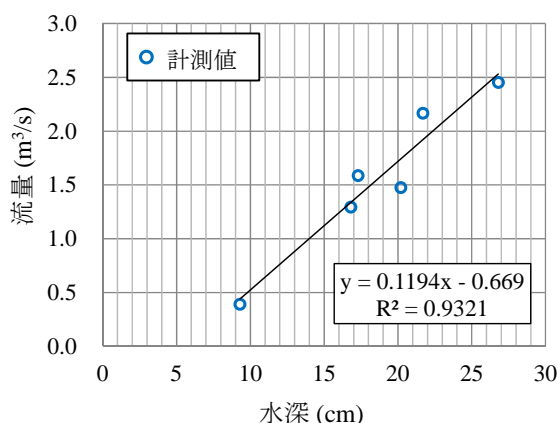


図 3.2.3 池尻川における水位流量曲線（図 3.2.2 の B 地点）

較的急勾配である。A～C 地点の様子を写真 3.2.2～写真 3.2.4 に示す。写真より、池尻川では上流域にのみ側壁沿いに植生域が形成され、それ以外の地点には土砂の堆積も側壁沿いの植生域もほぼ存在しないことが分かる。これは、池尻川の上流域の河床勾配が中・下流域よりも緩く、その他の地点に比べて土砂の堆積が生じやすいからだと推察される。

池尻川の上流域では、コンクリート三面張り河川に改修された今日においても、初夏になるとゲンジボタルの成虫が僅かに飛翔し、地元住民の身近なホタル鑑賞スポットとして親しまれている。これらのゲンジボタルは、目視観察によると成虫は側壁沿いに残された二次林を休息場所として利用し、幼虫はコンクリート製河床上の植生の根本（写真 3.2.5）を生息場所として利用する様子が確認されている。また、これらの植生の根本には、ゲンジボタル幼虫の餌となる巻貝のカワニナが多数確認される他、コオイムシ（準絶滅危惧、環境省 RDB）やヒメタイコウチ（絶滅危惧 I 類、兵庫県版 RDB）といった貴重種の生息も僅かながら確認されている。このように、コンクリート三面張り化された固定床河川であっても、河道内に植生域が存在するなどの物理環境次第で、ある程度多様な水生動物の生息場所を確保できる可能性がある。

そこで、次の 3.3 節では池尻川を対象に底生動物群集の事前調査を実施し、コンクリート三面張り河川内に存在する河道内物理環境と底生動物の生息状況の対応関係を確認する。これより、コンクリート三面張り河川であっても、ある程度多様な生物相を維持できる微生息場所の条件を把握し、池尻川において河川平面形状を変えずに環境修復を実現するためのゴール（目標）を設定する。



写真 3.2.2 池尻川上流域(図 3.2.2 の A 地点)



写真 3.2.3 池尻川中流域(図 3.2.2 の B 地点)



写真 3.2.4 池尻川下流域(図 3.2.2 の C 地点)



写真 3.2.5 コンクリート製河床の上に生えた
植生の根(図 3.2.2 の A 地点)

3.3. 底生動物の生息状況の事前調査と環境修復のゴール設定

3.3.1. はじめに

コンクリート三面張り河川において河川環境の修復を検討する場合、はじめに河道内の物理環境と底生動物群集との対応関係を把握し、どのような微生息場所の創出が必要であることを明らかにする必要がある。一般的に、水生昆虫に代表される底生動物は、微細な物理環境の変化に鋭敏に応答してその群集構造を異ならせることが知られている^{16), 17)}など。そのため、コンクリート三面張り河川においても、小規模な河道内物理環境の不均一性に対して底生動物の群集構造が応答することが予想される。たとえば、コンクリート三面張り河川であっても、わずかながら落差や土砂堆積、水際植生、凹みなどは存在する。これらの小規模な物理環境の違いに対する底生動物の応答特性や指標性を把握できれ

表 3.3.1 底生動物の事前調査における調査地点概要

調査地	図 3.3.1 上の 地点番号	植生の 被植率 (%)	川幅 (m)	代表水深 (cm)	河床材料
コンクリート区-1	No.7	5.0	4.4	3	コンクリート
コンクリート区-2	No.8	2.9	5.1	2	コンクリート
コンクリート区-3	No.9	2.8	5.1	2	コンクリート
植生区-1	No.1	35.6	3.0	2	コンクリート
植生区-2	No.2	33.4	2.8	3	コンクリート
植生区-3	No.6	12.3	4.7	4	コンクリート
淵造成区-1	No.3	0	5.9	31	砂利
淵造成区-2	No.4	0	3.7	15	砂利
淵造成区-3	No.5	0	4.2	34	砂利
淵造成区-4	No.8	0	4.1	20	砂利

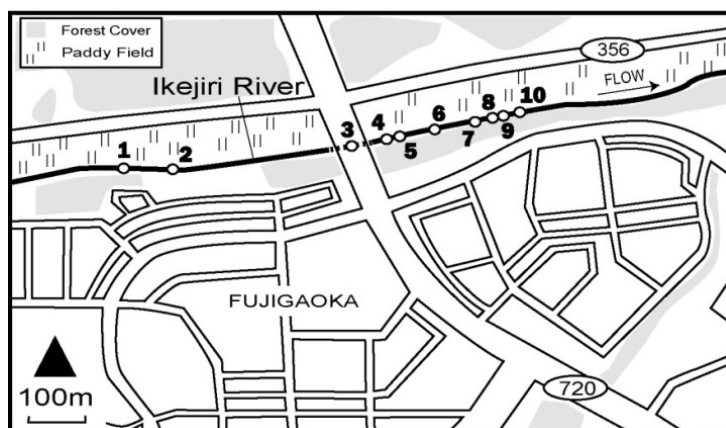


図 3.3.1 池尻川における底生動物の事前調査地点¹⁵⁾

ば、人為的な手段によって底生動物の生息場所を改善する際に必要な基礎的情報を得ることができると考えられる。

そこで、本節では、兵庫県三田市内を流れるコンクリート三面張り河川の池尻川を対象とし、河道内物理環境の違いと底生動物群集の生息状況との対応関係に関する事前調査を行うこととする。同時に、次節で環境修復を実施する際の実現可能なゴール（目標）を設定する。

3.3.2. 事前調査における底生動物の調査方法

表 3.3.1 に調査地点の概要を、図 3.3.1 に調査地点の位置を示す。表 3.3.1 に示すとおり、各調査地点の河道内物理環境は、側壁沿いに植生が繁茂する植生区、コンクリート河床が大部分を占めるコンクリート区、固定床河床の一部に凹部（防火マス）が設けられた淵造成区の 3 タイプに分類した。

底生動物の調査は 2008 年 6 月 8 日に実施した。調査方法は、各地点における採集時間（5 分間×2 人）のみを統一した半定量採集とした。採集した試料は目合い 0.52mm のフルイを用いて濾し、フルイの網上に残った試料のみを兵庫県河川水辺の国勢調査 2002¹⁸⁾ の同定基準に従って分類した。

3.3.3. 事前調査の結果と考察

池尻川における事前調査の結果、全調査地点を合わせて 50 分類群数に及ぶ底生動物の生息が確認された（Appendix3-1）。図 3.3.2 に確認された底生動物の分類群数を示す。図 3.3.2 より、底生動物の分類群数は植生区で最も多くなる傾向が認められた。これは、コンクリート三面張り河川には土砂の堆積域が殆ど存在しないため、側壁沿いに生息する植生は、底生動物の生息場所や増水時の避難場所として利用されているためと推察される。その一方で、コンクリート区における分類群数は調査地点間でのバラツキが大きかった（図 3.3.2）。これは、コンクリート区であっても側壁沿いにわずかでも植生が存在する場合、その被植率が底生動物の分類群数に強く影響するためと考えられる。

次に、図 3.3.3 に各地点における底生動物の確認個体数を示す。図 3.3.3 より、底生動物の生息数は植生区とコンクリート区で多く、淵造成区で少なくなる傾向が認められた。しかし、図 3.3.3 より植生区とコンクリート区を詳しく比較すると、植生区と異なり、コンクリート区の生物相はハエ目が大半を占める単純な生態系であることが分かる。これは金沢・三宅¹²⁾の報告と類似する結果であり、コンクリート製河床のような固定床領域では、河床材料の消失や流れの速さに耐えうる限られた種類の底生動物のみが高密度な群集を形成しやすいためと考えられる。池尻川のコンクリート区で確認されたハエ目は、その大半が小型のユスリカの仲間であった（Appendix3-1）。これらの小型のユスリカ類は河床の凹凸や固定床上に生えるアオミドロ等の藻類に付着することで、コンクリート製河床上での生息を可能としているものと推察される。一方、淵造成区では上述したとおり底生動物の生息数が少なかった。これについては、ここで詳細な検証を実施しないが、池尻川は平水時の水深がかなり浅いため、淵造成区の河床付近における水の交換が悪い可能性がある。

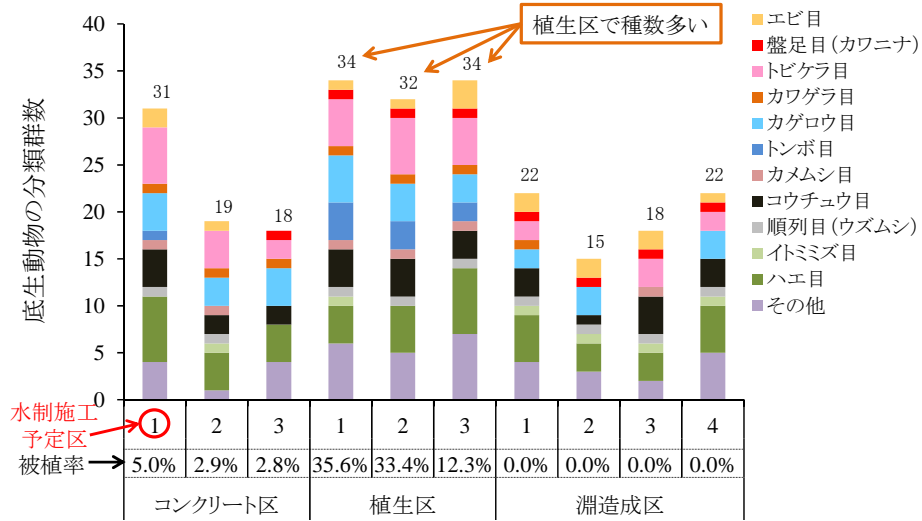


図 3.3.2 物理環境の違いに対する底生動物の分類群数

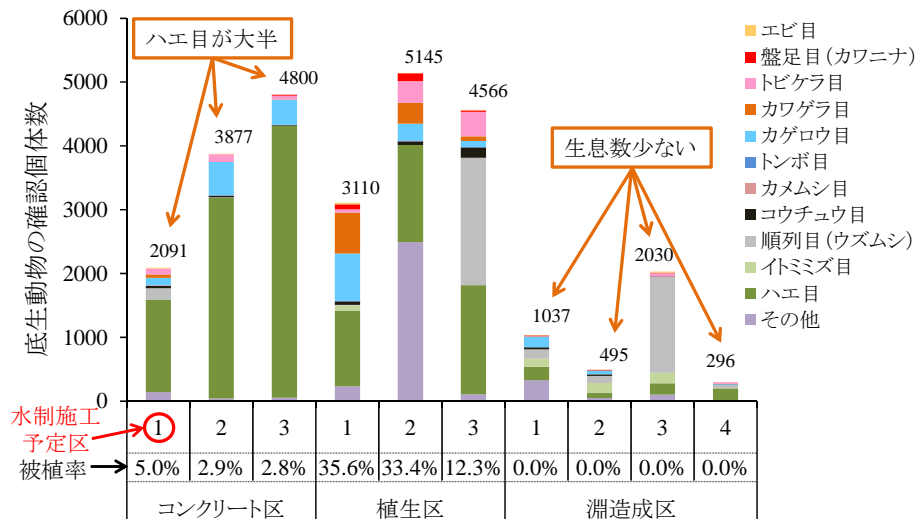


図 3.3.3 物理環境の違いに対する底生動物の確認個体数

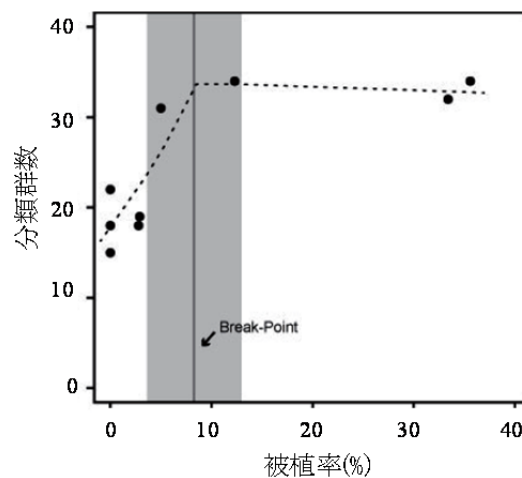


図 3.3.4 池尻川における植生の被植率と底生動物の分類群数¹⁵⁾

最後に、図 3.3.4 に全調査地点における植生の被植率に対する底生動物の分類群数の応答をプロットした結果を示す。図 3.3.4 より、池尻川では河道内の被植率が約 8~10%を下回るあたりから底生動物の分類群数が急激に減少することが分かる。逆に、河道内の被植率が約 10%以上存在する場合、コンクリート三面張り河川であっても比較的多様な底生動物群集が成立する可能性が伺われる。これらの結果より、本研究の 3.3 節で検討する池尻川の環境修復の最終的な到達目標は、河道内に少なくとも川幅 10%より広い範囲の植生域、あるいは将来的に植生繁茂が見込める流れの緩やかな領域を創出することとする。

3.4. 小規模な直角水制群による池尻川の環境修復効果と課題

3.4.1. はじめに

水制は、2.4 節で概説したとおり、水制近傍にて流れの偏向や河床の局所洗掘をもたらすと共に、水制下流域に土砂の堆積域を創出するため、単調化した河道内物理環境に多様性をもたらすことが期待されている。実際、水制のこうした特性を活かした河川生態系の修復事例は世界的に実施されており、いくらかの事例を除き^{19), 20), 21)}、水制近傍には魚類（主にサケ科、サンフィッシュ科、底生魚類）の種類数や個体数、幼魚数が増加し^{7), 22), 23), 24)}など、底生動物の生息状況が改善することが報告されている^{5), 25), 26)}など。なかでも、Nakano and Nakamura²⁵⁾は、直線化された標津川（移動床河川）にて蛇行形成と水制による底生動物群集の生息場所の改善を試みた結果、河岸近傍の底面せん断応力さえ抑制することができれば、底生動物の分類群数と生息密度がある程度回復することを示唆している。これらの報告は主に移動床河川を対象としたものであるが、こうした水制の有する環境修復機能をコンクリート三面張り河川にも適応することが可能であれば、河道形状を変えることなく、水生動物の生息環境を改善させることができると期待される。

そこで本研究では、池尻川に一般的な水制形状である不透過型の直角水制工群を設置し、その後、モニタリング調査から水制施工後の物理環境と底生動物の生息状況の変化について確認する。池尻川に設置した直角水制群は、上流域からの少ない供給土砂を側壁沿いに捕捉し、植生繁茂を促すことで、治水機能にかかわる河積をできる限り損なわずにゲンジボタル幼虫をはじめとする底生動物の生息場所を再生させることを期待するものである。ただし、現状では固定床河川に対する水制施工の設計基準は存在しない。このため、池尻川の水制群は移動床河川に適する水制施工の設計基準¹³⁾を参考に配置を決定している。したがって、この 3.4 節では、コンクリート三面張り河川の環境修復技術として移動床河川に対する水制施工の設計基準をそのまま適応した場合、どの程度の環境修復効果が得られるかを確認すると共に、今後に解決すべき課題を把握することとする。

3.4.3. 対象生物と指標生物

池尻川で環境修復の対象とする生物は、ゲンジボタル（写真 3.4.1）幼虫を含めた底生動物全般とする。一方、環境修復の効果を確認する指標生物には、ゲンジボタル幼虫の餌生物であるカワニナ（写真 3.4.2）、移動能力の低い二枚貝で砂礫底を好むシジミ属（写真 3.4.3）、底生動物全般の中から比較的大型（全長約 15mm 以上）のエビやトンボ類などの生物種、そして石礫を巣材として利用するトビケラの仲間（写真 3.4.4）を対象とする。本研究では、池尻川に小規模な直角水制群を施工した後、これらの底生動物の生息状況の変化を調べ、固定床河川に設置された水制群がもたらす環境修復効果を確認する。

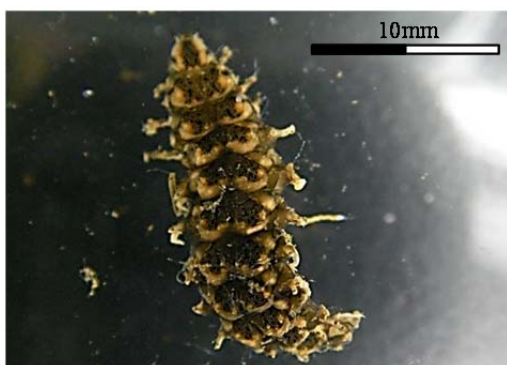


写真 3.4.1 ゲンジボタル幼虫



写真 3.4.2 カワニナ



写真 3.4.3 シジミ属



写真 3.4.4 砂礫で巣をつくるニンギョウトビケラ幼虫

3.4.4. 直角水制群の施工と配置

池尻川への水制群の施工は、2009 年 3 月 29 日に実施した^{※1}。水制は U 字溝にコンクリート材を詰めた簡易なものとし、埋め込みアンカーとボルトを用いて手作業で池尻川に固定した²⁷⁾。水制の配置と規格を図 3.4.2 示す。水制は合計 9 基を片側 3 連ずつ交互に配置した。水制サイズは、流路横断方

※1 池尻川への水制施工は兵庫県宝塚土木（旧三田土木）の主催する武庫川上流域ルネッサンス懇談会の企画である「武庫川チャレンジ」内にて承認を経て実施したものである。著者は兵庫県三田市内で活動する市民団体（水辺のフィールドミュージアム研究会）として枠組みの中に参加した。

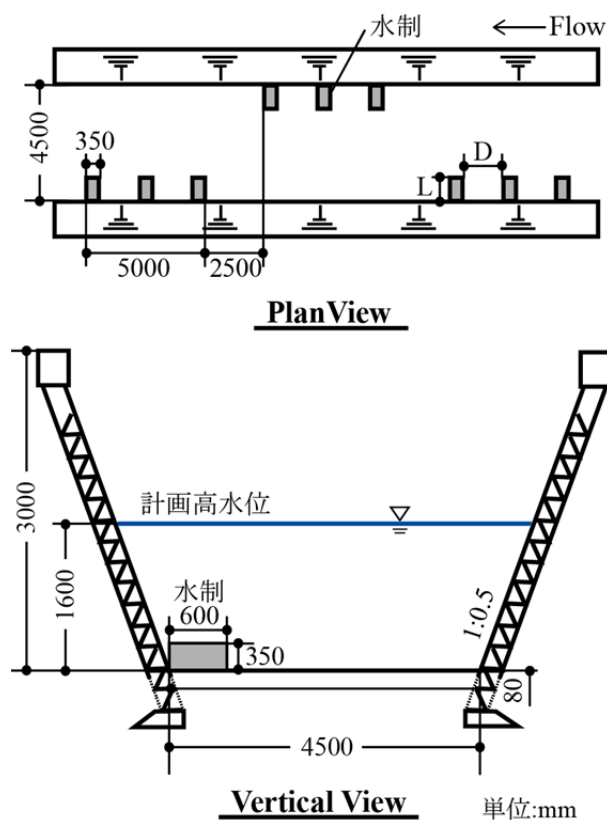


図 3.4.2 水制工の配置および規格



写真 3.4.5 小規模水制群の設置後の様子(下流から上流を望む, 2009/3/29)

向の水制長 0.6m (川幅の約 1/7 倍), 水制幅 0.35m, 水制高 0.35m とし, 水制群のアスペクト比 (水制間隔 D /水制長 L) は 3.5 とした。このアスペクト比の値は, 秋草ら²⁸⁾ によって整理された実河川にて採用数の多い値を参考とした。写真 3.4.5 に, 水制施工後の池尻川の様子を示す。

3.4.5. モニタリング調査の方法

池尻川に小規模水制群を設置した後、水制近傍の流れと土砂の堆積状況、および底生動物群集の生息状況の変化のモニタリング調査を行った。各調査項目について順に説明する。

(1) 流れ構造の調査方法

水制近傍に形成される流れ構造の調査は、電磁流速計（AEM-1D, JFE アレック）を用い、河川縦断方向のみを対象に時間平均流速を調べた。表 3.4.2 に調査日の水理諸元を示す。調査は、増水時と平水時に 1 回ずつ行った。調査時の水制群の越流状況は、増水時と平水時のいずれも非越流状態であった。これは、水制群が越流状態になるまで増水した状況では河道内の流速が 2.5m/s ～ 3.0m/s を超えるため、測定不可能であったためである。

なお、増水時の池尻川内には掃流砂が輸送されていると考えられるが、その存在を目視で確認することはできなかった。これより、池尻川を流れる掃流砂量は非常に少なく、増水時に固定床上を流れる流砂が水深に与える影響は殆どないと考えられる。

表 3.4.2 増水時と平水時の水理諸元

調査時	調査日	流量 Q (m^3/s)	平均水深 h (cm)	水制の 越流状況	備考
増水時	2009/4/25	0.101	10	非越流	表層と底層で測定
平水時	2009/6/6	0.0125	2	非越流	表層で測定

(2) 土砂の堆積状況の調査方法

水制近傍の土砂の堆積状況は、水制近傍の河床高の変動量から把握した。調査は、表 3.4.3 に示す増水直後の 2010 年 3 月 28 日（水制施工から 1 年後）、降雨の少ない夏期の 2010 年 7 月 16 日および 2010 年 8 月 22 日に実施した。河床変動量の測定方法は、水制近傍の土砂の堆積状況がかなり小規模であったため、メジャーを用いて堆積範囲と堆積厚を測定するものとした。

この他、河床変動量とは別に、2010 年 8 月 22 日に水制域（水制群に囲まれた領域）に堆積した土

表 3.4.3 土砂の堆積状況の調査日および底生動物の調査日

調査時	調査日	土砂の堆積状況 の調査	底生動物 の調査
春季(増水直後)	2010/3/28	河床高の測定	詳細調査
春季	2010/5/4	—	簡易調査
夏季	2010/7/16	河床高の測定	
	2010/8/22	河床高の測定 と粒度の測定	

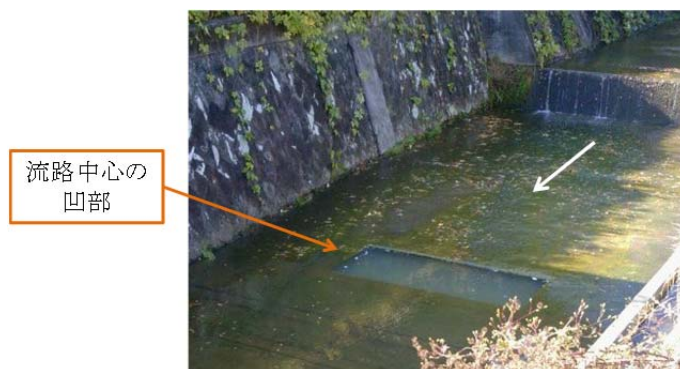


図 3.4.3 水制施工区より下流側に位置する防火用マス(0.45m×1.0m×0.30m)

砂と水制より下流側の流路中心部に位置する凹部（図 3.4.3）に堆積した土砂を採集し、各々の粒度分布を計測した。これは、水制域に堆積する土砂と、池尻川の流砂の平均粒径を比較するものである。

(3) 底生動物の調査方法

水制施工後、底生動物群集の生息状況の変化を把握するため、詳細調査と簡易調査を実施した。詳細調査は、表 3.4.3 に示す増水直後の 2010 年 3 月 28 日に実施し、簡易調査は春季の 2010 年 5 月 4 日、および降雨の殆どない夏季の 2010 年 7 月 16 日と 2010 年 8 月 22 日に実施した。底生動物の調査地点図を図 3.4.4 に示す。各々の調査区間は 5.0m×4.5m に統一し、水制施工区として S1～S3 を、未施工区として C1～C3 を設定した（図 3.4.4）。

詳細調査の調査方法は、底生動物の採集時間を全地点で統一（5 分間×2 人）した半定量調査とした。採集した試料は、目合い 0.52mm のフルイを用いて濾し、フルイの網上に残った試料のみを兵庫県河川水辺の国勢調査 2002¹⁸⁾ の同定基準に従って分類した。一方、簡易調査の調査方法は、詳細調査と同じ 6 地点を対象とし、目視で簡単に見分けられるゲンジボタル幼虫、および大型の貝類であるカワニナとシジミ属の生息個体数のみを現地確認するものとした。

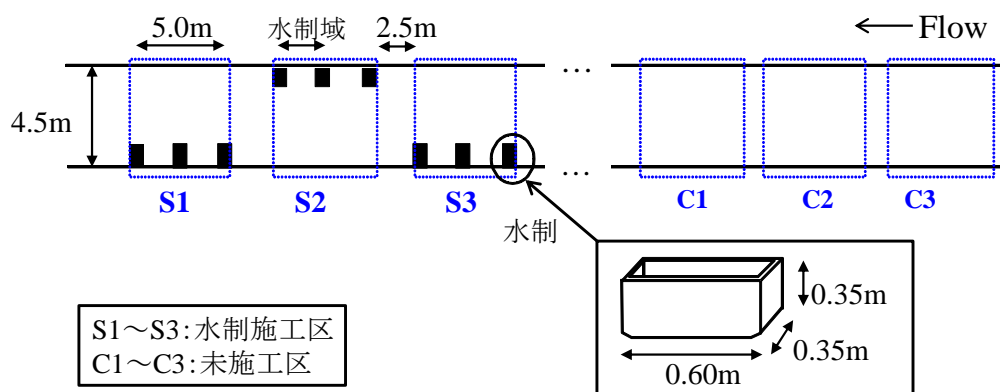


図 3.4.4 底生動物の調査地点概要

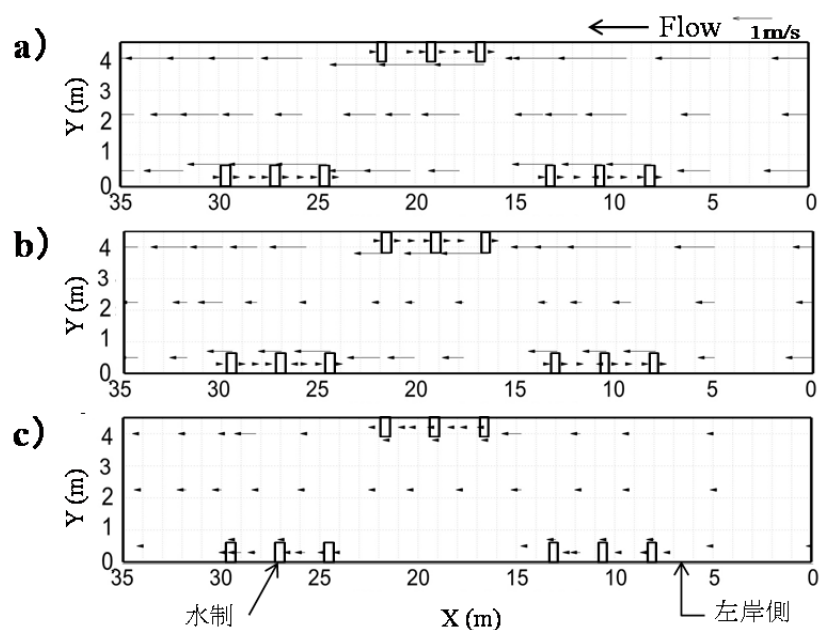


図 3.4.5 実測された水制近傍の河川縦断流速ベクトル, a) 増水時の表層流れ, b) 増水時の底層流れ, c) 平水時の表層流れ

3.4.6. 結果と考察

(1) 流れ構造

図 3.4.5 に、池尻川の増水時と平水時における河川縦断方向の流速ベクトルを示す。図 3.4.5 a) は増水時の表層流れ、図 3.4.5 b) は増水時の底層流れ、図 3.4.5 c) は平水時の表層流れを示したものである。

図 3.4.5 a) および図 3.4.5 b) より、増水時の流れは、水制のない大部分の領域にて流速 1m/s を超える速い流れが生じる一方で、水制域には逆流が生じ、かなり穏やかな流れ場が形成されることが分かる。これは、水制先端部から剥離した流れの一部が水制域へ流入し、水制域内に水平渦を形成したためと考えられる。この水平渦は、既存研究によると水制群のアスペクト比が 2.0～3.0 程度の場合に安定して形成されると報告されている²⁹⁾。池尻川の水制群のアスペクト比は 3.5 と既存報告よりも若干大きな値であったが、ある程度安定した水平渦が形成されていたようである。その他、図 3.4.5 b) より、主流域である流路中心部の底層においても流速の遅い領域が認められる。これは、調査時の流路中心部には大型糸状藻類であるアオミドロが密生していたため、水制群とは関係なく、流速を抑制する働きが生じたものと考えられる。

一方、図 3.4.5 c) より、平水時には水制域に流れの逆流域が形成されないことが分かる。これは、池尻川のような河道全面に流れが平滑化されたコンクリート三面張り河川の場合、平水時の水深が極めて浅くなるため、水制が流れに与える粗度効果が小さく、水制先端部からの水平渦の発生が抑制されるためと考えられる。したがって、平水時における池尻川の水制群は、水制域に止水的な環境をつ

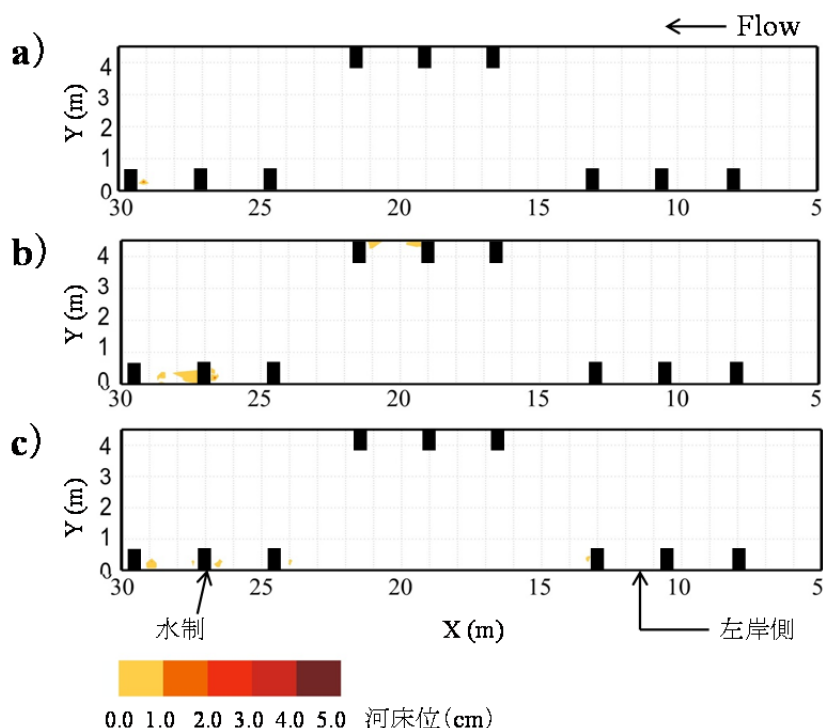


図 3.4.6 水制近傍の河床位高の変化, a)2010/3/28, b)2010/7/16, c)2010/8/22

くることなく、主流域との水交換が十分に行われていると推察される。

以上のことから、池尻川の水制群は、水制域にある程度安定した流れの緩やかな領域を形成するため、増水時における底生動物の避難場所として機能することが期待される。ただし、本調査では水制群が越流状態の場合に関しては調べることはできなかった。コンクリート三面張河川は増水時の流速が極めて速くなるため、越流水制まわりの流れ構造を現地測量することはほぼ不可能である。越流水制については、水路実験あるいは数値解析にて水制近傍の水理特性を検討する方が望ましいと考えられる。

(2) 土砂の堆積状況

図 3.4.6 に、水制施工後の水制近傍における河床変動量を示す。また、図 3.4.7 に水制域と流路中心部の凹部で採取した土砂の粒度分布の比較を示す。図 3.4.6 に示すとおり、水制施工後、いくつかの水制域には土砂が円形に近い形状で堆積した。しかし、その堆積形状は調査日ごとに異なる不安定なもので、その堆積厚も数 mm～15mm 程度とかなり小規模なものであった。これは、図 3.4.7 に示すとおり、水制域に堆積した土砂の平均粒径 d_m は 2.24mm 程度と小さく、一度堆積した砂礫が流されやすい状態にあったためと考えられる。

次に、図 3.4.7 より水制域に堆積した土砂と流路中心部の凹部に堆積した土砂の粒度分布を比較する。図 3.4.7 より、流路中心部に位置する凹部に堆積する土砂の平均粒径 d_m は 16.9mm（粒径 500mm 以上の出現頻度の小さい礫を除く）であり、水制域に堆積する土砂よりかなり大きいことが分かる。このことは、池尻川の水制群が水制域に比較的小粒径の流砂のみを堆積させ、大粒径の流砂を殆ど捕

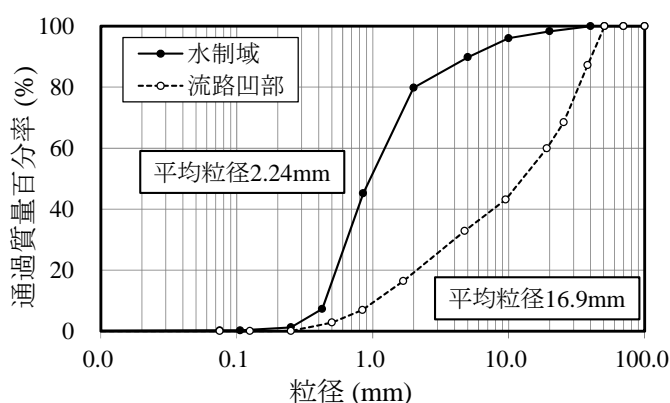


図 3.4.7 水制域に堆積する土砂と流路中央部の凹部に堆積する土砂の粒径加積曲線

捉しないことを示すものである。これは、大粒径の流砂ほど非平衡性が強く、水制群による流れの偏向の影響を受けずに固定床上を直線的に流れやすいためと考えられる。

なお、本検討にて池尻川に施工した直角水制群は、移動床河川に対する水制施工の設計基準を参考としたものであった。つまり、本検討にて池尻川の水制近傍に十分な土砂の堆積域が創出されなかった理由には、池尻川における上流からの供給土砂量がそもそも少ないことに加え、移動床と固定床上に設置した水制近傍の流砂、河床変動特性が異なっていることが原因の可能性も考えられる。これらの疑問に関しては後ほど第5章にて水路実験および数値解析から再度考察することとする。

(3) 底生動物群集の生息状況

表 3.4.4 に詳細調査の結果を、表 3.4.5 に簡易調査の結果を示す。なお、表 3.4.4 に示す詳細調査の結果は、底生動物の種類数と確認個体数、および 3.2.4 節で述べた指標生物（カワニナ、シジミ属、ゲンジボタル幼虫、石礫で巣をつくる生物種、エビやトンボ類などの全長約 15mm 以上の大型種）のみを抽出して記載したものである。詳細調査で確認された全分類群のリストは、章末の Appendix3-2 に記載する。

表 3.4.4 より、水制施工区では、水制の未施工区に比べて底生動物の種類数と個体数が共に増加する傾向が認められた。また表 3.4.4 および表 3.4.5 より、水制施工区ではカワニナやシジミ属といった貝類、カワリヌマエビ属やシオカラトンボ幼虫といった大型の底生動物種、砂礫を利用して巣をつくるトビケラ類の幼虫の生息数も増加したことが分かる。現地での目視観察によると、これらの生物種は主に水制域で確認され、コンクリート製河床上に薄く堆積した土砂や側壁沿いの植生の根を生息場所として利用していた。これより、池尻川の水制群は、少なからず底生動物の生息状況の改善に寄与しているものと推察される。ただし、今回の調査では全ての地点でゲンジボタル幼虫の生息は確認されなかった。

以上の結果より、池尻川に設置した直角水制群は、水制域に堆積する土砂が小規模かつ不安定であっても、水制の未施工区と比べると底生生物の生息場所として幾分機能するようである。これは、固定床河川ではわずかな増水でも流速の速い流れ場が形成されるため、吸盤を有するような限られた生物種以外の定着が難しく³⁰⁾、水制群によって水制域に形成された流れの緩流域がこの制約条件を多少

表 3.4.4 詳細調査の結果(増水直後の 2010/3/28)

種名	水制施工区			未施工区		
	S1	S2	S3	C1	C2	C3
種類数	25	20	24	19	20	20
全個体数	1,494	1,616	2,570	1,275	568	1,266
カワニナ	10	—	—	—	—	—
シジミ属	2	—	40	—	—	—
カワリヌマエビ属	17	18	9	7	1	2
シオカラトンボ	4	—	5	1	—	—
コエグリトビケラ属	21	18	16	8	1	6
ニンギョウトビケラ	27	8	7	4	1	—
ゲンジボタル	—	—	—	—	—	—

表 3.4.5 簡易調査の結果

種名	調査日	水制施工区			未施工区		
		S1	S2	S3	C1	C2	C3
カワニナ	2010/5/4	1	—	—	—	—	—
	2010/7/16	3	—	4	—	—	—
	2010/8/22	4	—	—	—	—	—
シジミ属	2010/5/4	—	—	—	—	—	—
	2010/7/16	2	—	1	—	—	—
	2010/8/22	—	—	—	—	—	—
ゲンジボタル	2010/5/4	—	—	—	—	—	—
	2010/7/16	—	—	—	—	—	—
	2010/8/22	—	—	—	—	—	—

緩和するためと推察される。ただし、ゲンジボタル幼虫が未確認であることを含め、水制群による池尻川の環境修復効果は満足できるものとは言えない。これは、固定床上に設置した水制群による土砂の堆積域の形成が小規模であったことに加え、この堆積地形が増水のたびに地形変化するような不安定なものであったことが要因ではないかと推察される。

3.5. 結 論

本章では、コンクリート三面張り河川である池尻川を対象とし、一般的な水制形状である不透過型の直角水制工群を利用した河川環境の修復効果について検証した。これより次の結果と課題を得た。

- (1) 池尻川の水制群は、側壁沿いに土砂を堆積させて植生の繁茂を促すことで、底生動物の生息場所を回復させることを目的に設置したものである。増水時、水制群は水制域内に流れの緩やかな領域を形成すると共に、僅かではあるが土砂の堆積域を創出した。また、水制施工後の底生動物群集は、その生息状況を水制施工区と未施工区で比較した結果、若干ではあるものの種類数と個体数が増加し、カワニナやシオカラトンボ幼虫といった大型種の生息数が増加する状況も確認することができた。しかしながら、水制近傍における底生動物の生息状況は明瞭に改善されたとは言い難く、期待したほどの成果は得られなかった。これは、固定床上に設置した水制群による土砂の堆積域の形成が小規模であったことに加え、この地形が増水のたびに全て地形変化するような不安定なものであったためではないかと推察される。
- (2) 本検討にて池尻川に施工した水制群は、移動床河川のための水制工の設計基準を参考にしたものであった。このため、池尻川にて水制近傍に十分な土砂の堆積地形が創出されなかった理由は、池尻川における上流からの土砂供給量がそもそも少ないことに加えて、固定床河川に移動床河川に用いる水制工の設計基準をそのまま適応したことが原因の可能性が考えられる。したがって、固定床河川の環境修復計画を策定するには、まず始めに固定床上に土砂が堆積する過程で生じる移動床と固定床の混在するような場の流砂・河床変動特性を把握したうえで（第4章で実施）、固定床河川の環境修復に水制工を利用するか否かを判断する必要がある。また、水制工を利用するのであれば、移動床と固定床上に設置された水制近傍の流砂・河床変動特性の違いを確かめると共に、固定床河川に適した水制配置を検討することが必要だと考えられる。（第5章で実施）。

参考文献

- 1) Takahashi, G. and Higashi, S: Effect of channle alteration on fish hatitat, Japanese Journal of Limnology, 45(3), pp.178-186, 1984.
- 2) 井上幹生・中野繁：小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所，日本生態学会誌，44(2)，pp.151-160, 1994
- 3) 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進：河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響，応用生態工学会誌，4(2)，pp.133-146, 2001.
- 4) 豊島照雄・中野繁・井上幹生・小野有五・倉茂好匡：コンクリート化された河川流路における生息場所の再造成に対する魚類個体群の反応，日本生態学会誌，46(1)，pp.9-20, 1996.
- 5) Roni, P., Bennett, T., Morley, S., Pess, G. R., Hanson, K., Slyke, D. V. and Olmstead, P.: Rehabilitation of bedrocks stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota, River Research and Applications, 22(9), pp.967-980, 2006.
- 6) 石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・剣持浩高・高橋浩輝・丸岡 昇・岩瀬 晴夫：河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価，応用生態工学会誌，12(1)，pp.57-66, 2009.

- 7) Shields Jr., F. D., Cooper, C. M. and Knight, S. S.: Experiment in stream restoration, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), pp.494-502, 1995.
- 8) 梶野健・浅見和弘・中畠一彦・杉尾俊治・林貞行・高橋陽一: 浦山ダム下流に投入した土砂がウグイの産卵にもたらす効果について: ダム下流河川における土砂投入効果, *応用生態工学会誌*, 6(1), pp.51-58, 2003.
- 9) 角野康郎・安田忍・大亦昌史・衣笠浩二: 和歌山県荒見井水路の改修にともなうリュウノヒゲモ群落保全の取り組み, *応用生態工学会誌*, 11(1), pp.103-106, 2008.
- 10) 竹林洋史・江頭進治・金海生: 交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級, *水工学論文集*, 41, pp.95-900, 1997.
- 11) 早川博・宮本大・夏井皓盛: 屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究, *水工学論文集*, 55, pp.781-786, 2011.
- 12) 金澤康史・三宅洋: コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, *応用生態工学会誌*, 9(2), pp.141-150, 2006.
- 13) ニキティン, I (福留修文・山脇正俊訳): 水制の理論と計算 近自然河川工法の発想を助けるために, 信山社サイテック, 1995.
- 14) 県立有馬高校科学部: コンクリートの川にホタルを増やそう, 第 31 回近畿高等学校総合文化祭 (講演要旨), 2011.
- 15) 佐々木宏展・大澤剛士・久加朋子・前田知己・石田裕子・清水洋平・三橋弘宗: コンクリート三面張り河川における生息場所不均一性と底生動物の群集構造の関係, *人と自然*, 22, pp.13-20, 2011.
- 16) 柴田篤弘・谷田一三: 日本の水生昆虫一種分化とすみわけをめぐって, 東海大学出版会, 東京, 1989.
- 17) The ASCE Task Committee on Sediment Transport and Aquatic Habitats, Sedimentation Committee: Sediment and aquatic habitat in river systems, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), pp.669-687, 1992.
- 18) 兵庫県土木整備土木局河川課: ひょうごの川・自然環境調査マニュアル, 兵庫県, 2002.
- 19) Pretty, J. L., Harrison, S. S. C., Shepherd, D. J. and Smith, C. River rehabilitation and fish populations: assessing the benefit of instream structures, *Journal of Applied Ecology*, 40(2), pp.251-265, 2003.
- 20) Harrison, S. S. C., Pretty, J. L., Shepherd, D., Hildrew, A. G., Smith, C. and Hey, R. D.: The effect of instream rehabilitation structures on macroinvertebrates in lowland rivers, *Journal of Applied Ecology*, 41(6), pp.1140-1154, 2004.
- 21) Radspinner, R. R., Lightbody, A. F. and Sotiropoulos, F.: River training and ecological enhancement potential using in-stream structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136, pp.967-980, 2010.
- 22) Poizat, G. and Pont, D.: Multi-scale approach to species-habitat relationships: juvenile fish in a large river section, *Freshwater Biology*, 36(3), pp.611-622, 1996.

- 23) Hartman, K.J. and Titus, J. L.: Fish use of artificial dike structures in a navigable river, *River Research and Applications*, 26(9), pp.1170-1186, 2010.
- 24) 福留修文・藤田真二・福岡捷二: 淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, *水工学論文集*, 54, pp.1267-1272, 2010.
- 25) Nakano, D. and Nakamura, F.: Responses of macroinvertebrate communities to river restoration in a channelized segment of the Shibetsu River Northern Japan, *River Research and Applications*, 22, pp.681-689, 2006.
- 26) Muotka, T., Paavola, R., Haapala, A., Novikmec, M., Laasonen, P.: Long-term recovery of stream habitat structure and benthic invertebrate communities from in-stream restoration, *Biological Conservation*, 105(2), pp.243-253, 2002.
- 27) 久加朋子・清水洋平・大澤剛士・石田裕子・佐々木宏展・稲本雄太・三橋弘宗: コンクリート河川におけるゲンジボタルとカワニナの生息場所再生の試みー簡易水制の設置方法と効果検証ー, *人と自然*, 21, pp.159-165, 2010.
- 28) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦: 水制に関する研究, *土木研究所報告書*, 107, pp.61-135, 1960.
- 29) 池田駿介・杉本高・吉池智明: 不透過水制群を有する流れの水理特性に関する研究, *土木学会論文集*, 656, pp.145-155, 2000.
- 30) Boyero, L. and Bosch, J.: The effect of riffle-scale environmental variability on macroinvertebrate assemblages in a tropical stream, *Hydrobiologia*, 524(1), pp.125-132, 2004.

Appendix3-1: 事前調査にて確認された底生動物リスト (2008/6/8)

No	綱名	目名	科名	和名	学名	コンクリ区1	コンクリ区2	コンクリ区3	捕生区1	捕生区2	捕生区3	淵区1	淵区2	淵区3	淵区4
1	1 環虫綱	環虫目	サンカクアタマウスミシ科	アメリカナシウスミシ	<i>Girardia tigrina</i>	180	4	3	11	1	1996	146	114	1503	50
2	2 環虫綱	環虫目	タニシ科	ヒメタニシ	<i>Sinotaila quadrita histrica</i>										
3	3 環虫綱	環虫目	カワニナ科	カワニナ	<i>Semistiloscopia libertina</i>			13	81	122	19	11		8	2
4	4 環虫綱	環虫目	モノアラガイ科	ヒメモノアラガイ	<i>Austropeplea ollula</i>				4	22					
5	5 環虫綱	環虫目		コンダヒメモノアラガイ	<i>Fossaria truncatula</i>	1					2				
6	6 環虫綱	環虫目		モノアラガイ	<i>Radix auricularia japonica</i>							1			2
7	7 環虫綱	環虫目	サカマキガイ科	サカマキガイ	<i>Physa acuta</i>	101	42	29	177	2280	25	301	50	100	2
8	8 環虫綱	環虫目	ヒラマキガイ科	ヒラマキガイ	<i>Planorbis sp.</i>						10				
9	9 二枚貝綱	マルスダレガイ目	シジミ科	シジミ	<i>Corbicula sp.</i>	1		22	9	1	10	29	2	2	1
10	10 ミスミシ綱	イトミスミシ目	イトミスミシ科	イトミスミシ	<i>Tubificoides sp.</i>		1		82			129	157	163	5
11	11 ヒル綱	無吻蛭目	インビル科	インビル	<i>Eprobilidae sp.</i>				1	1					3
12	12 ヒル綱	ワラジムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Asellus hilgendorffi hilgendorffi</i>	40		2	40	189	57	1			1
13	13 ヒル綱	エビ目	スズメビシ科	スズメビシ	<i>Neocaridina sp.</i>	7			23	6		1			5
14	14 ヒル綱	エビ目	スズメビシ科	スズメビシ	<i>Palaemon pascuensis</i>						1				
15	15 ヒル綱	エビ目	アメリカザリガニ科	アメリカザリガニ	<i>Procambarus clarkii</i>	4	6					6	2	11	1
16	16 ヒル綱	エビ目	アメリカザリガニ科	アメリカザリガニ	<i>Geothelphusa dehaani</i>						1				
17	17 野虫綱	カゲロウ目	コカゲロウ科	サバコカゲロウ	<i>Baetis sahoensis</i>	68	189	34	434	93	54	131	31		1
18	18 野虫綱	カゲロウ目	コカゲロウ科	サバコカゲロウ	<i>Baetis taiwanensis</i>	1	23	6	41	43	30				2
19	19 野虫綱	カゲロウ目	コカゲロウ科	Gコカゲロウ	<i>Labobaetis atrebatinus</i>	1			41	1					
20	20 野虫綱	カゲロウ目	コカゲロウ科	Hコカゲロウ	<i>Tenubaetis sp.H</i>	45	314	354	228	128	10	35	27		6
21	21 野虫綱	トンボ目	カワトンボ科	カワトンボ	<i>Baetidae sp.</i>			2	1						
22	22 野虫綱	トンボ目	サナエトンボ科	サナエトンボ	<i>Calopteryx alrata</i>	1			2	8	3				
23	23 野虫綱	トンボ目	サナエトンボ科	サナエトンボ	<i>Sieboldius allardae</i>										
24	24 野虫綱	トンボ目	トンボ科	シオカトノボ	<i>Orithetrum albistylum speciosum</i>				2	2					
25	25 野虫綱	カワガタ目	オナシカワガタ科	オナシカワガタ	<i>Orithetrum triangulare melania</i>				2	1	2				
26	26 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Nemoura sp.</i>	53	1	3	640	327	72	2			
27	27 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Micronecta sp.</i>	10	3		1						
28	28 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Apasus japonicus</i>									1	
29	29 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Nepa hofmanni</i>					1					
30	30 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Cheumatopsiche sp.</i>	1	1			3	12				
31	31 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Hydroptila sp.</i>	71	106	55	28	245	333	2		46	21
32	32 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Apatania sp.</i>	2	8		5	81					
33	33 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Goera japonica</i>	17	5	2	10	5	28	3			1
34	34 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Lepidostoma sp.</i>	2			2	4	13				
35	35 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Mystacides sp.</i>	1			4	2					
36	36 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Tijula sp.</i>	2			1	10	17	1		20	7
37	37 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Psychodidae sp.</i>	10				41	10				
38	38 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Tanytarsini sp.</i>	100	80				303	20		100	75
39	39 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Chironominae sp.</i>	30		2			21		20		63
40	40 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Orthocladinae sp.</i>	631	2557	3896	429	248	764	134	51	61	24
41	41 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Tanyptodinae sp.</i>	83	20	21	387	376	162	26	3		21
42	42 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Simulium sp.</i>	590	490	343	368	847	433	26			
43	43 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Polydora intermedius</i>										
44	44 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Coriostoma stultum</i>	2			4	4	62				
45	45 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Berosinae sp.</i>	1									
46	46 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Hydrophilidae sp.</i>	25	7	11	27	28	81	26	24	2	5
47	47 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Elmidae sp.</i>	10					20	1			1
48	48 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Ectopria opaca opaca</i>				21	4					
49	49 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Eubrianax sp.</i>					21					
50	50 野虫綱	カメムシ目	ミスミシ科	ミスミシ	<i>Psephenoides japonicus</i>										
種数						31	20	18	34	32	34	22	15	2	2
総個体数						2091	3877	4800	3110	5145	4566	1037	495	2030	296

環境省ROB 順絶滅危惧
兵庫県ROB 絶滅危惧Ⅰ類

(注) 調査時期が6月であるため、ゲンジボタル幼虫は水中にて確認されていない。

Appendix3-2: 詳細調査にて確認された底生動物リスト (2010/3/28)

No	門名	目名	種名	学名	水制施工区			未施工区		
					S1	S2	S3	C1	C2	C3
1	扁形動物門	嚙列目	アメリカミウズムシ	<i>Girardia tigrina</i>	112	373	110	286	21	131
2	軟体動物門	螺足目	カフニナ	<i>Semislucospira libertina</i>	10					
3		基眼目	サカマキガイ	<i>Physa acuta</i>	1					
4			コンダカヒメノアラガイ	<i>Fossaria truncatula</i>	1					
5		マルスダレガイ目	ジミミ	<i>Corbicula sp.</i>	2		40			
6	節足動物門	ダニ目	ダニ	<i>Acarina sp.</i>	30	20		10	40	70
7		ワラジムシ目	ミズムシ	<i>Asellus hilgendorfi hilgendorfi</i>	2	4	42	5	1	1
8		エビ目	カフリスマエビ	<i>Neocaridina sp.</i>	17	18	9	7	1	2
9		カゲロウ目(蜉蝣目)	フタモンコガロウ	<i>Baetis taiwanensis</i>	1	11	22	31	2	1
10			シロハラコガロウ	<i>Baetis thermicus</i>	1	1				1
11			Gコガロウ	<i>Labobaetis atrebatinus</i>	60	22	3	2	1	1
12			Hコガロウ	<i>Tenuibaetis sp.H</i>	17	32	6	14	8	30
13		トンボ目(蜻蛉目)	シオカラトンボ	<i>Orthetrum albistylum speciosum</i>	4		5	1		
14		カワゲラ目(セキ翅目)	オナシカワゲラ	<i>Nemoura sp.</i>	42	145	135	120	34	70
15		トビケラ目(毛翅目)	コガタシマトビケラ	<i>Cheumatopsyche brevinleata</i>		1			1	
16			ヒメトビケラ	<i>Hydroptila sp.</i>	173	140	50	193	47	93
17			コエグリトビケラ	<i>Apantia sp.</i>	21	18	16	8	1	6
18			ニンギョウトビケラ	<i>Goera japonica</i>	27	8	7	4	1	
19			コカケツトビケラ	<i>Lepidostoma sp.</i>	6	3	29	2	3	9
20			アオヒゲナガトビケラ	<i>Mystacides sp.</i>	3		11			
21		ハエ目(双翅目)	ヒメガガンボ亜科	<i>Limoninae sp.</i>			2			
22			チョウバエ科	<i>Psychodidae sp.</i>						5
23			ヌカガ科	<i>Geratopogonidae sp.</i>			12			
24			ユスリカ亜科	<i>Chironominae sp.</i>	13	162	1155	144	67	87
25			エリユスリカ亜科	<i>Orthocladinae sp.</i>	908	552	818	402	328	717
26			モンユスリカ亜科	<i>Tanypodinae sp.</i>	33	61	45	14	1	11
27			アシマダラフコ	<i>Simulium sp.</i>	8	23	6	15	2	9
28		コウチュウ目(鞘翅目)	ガムシ科(成虫)	<i>Hydrophilidae sp.</i>	1	1	10			
29			ガムシ科(幼虫)	<i>Hydrophilidae sp.</i>			12	2	1	
30			チビゲナガハナノミ	<i>Ectopria opaca opaca</i>	1	21	15	15	3	12
31			マスダチドロムシ	<i>Malacopsephenoides japonicus</i>						5
32			ヒメドロムシ亜科	<i>Elminae sp.</i>			10		5	5
種数					1494	1616	2570	1275	568	1266
個体数(5分間採集)					25	20	24	19	20	20

第4章 移動床と固定床が混在する場の掃流砂、河床変動特性

4.1. 概 説

移動床、あるいは固定床のみを対象とした流砂の輸送特性や伝播特性に関する研究は数多く存在する^{1), 2), 3)}など。しかし、固定床に土砂が堆積する過程で生じる移動床と固定床が混在するような場については、流砂の輸送特性や河床変動特性に関する知見は非常に少ない^{4), 5), 6), 7), 8)}。

河道に移動床と固定床が混在する場では、上流からの流砂が時空間的に変動する非平衡場が形成されやすい。江頭ら⁴⁾は、固定床領域から移動床領域へと河床形態が変化する際の流砂条件や流れの抵抗則を理論的に導くとともに、水路実験にてその妥当性を検証している Takebayashi et al.⁶⁾は、移動床の下に固定床領域が埋没する砂州河川において河床低下が進行する場合について、水路実験と数値解析から河床変動特性を検討している。これより、移動床河川にて固定床領域が露出した場合、固定床部分にて河床低下が抑制されるため、それに伴い砂州の波高の減少と砂州の横断方向のモードが発達すること、および移動床領域の場合よりも小さな川幅・水深比で交互砂州と複列砂州の境界領域が出現することを指摘している。また、早川ら⁸⁾は、固定床河川の湾曲蛇行部では水衝部にて水面が盛り上がり流が淀むため、移動床河川と異なり蛇行部の外岸側に土砂の堆積域が生じること、およびこの傾向は湾曲部の蛇行角が大きくなるほど無次元掃流力の偏りが大きくなるために顕著になることを報告している。

以上のように、移動床と固定床の混在する場の流砂・河床変動特性に関する検討は幾らか存在する。しかしながら、これらの知見は非常に限られたものであり、固定床の露出する露岩河川やコンクリート三面張り河川において土砂の堆積域を創出するような環境修復事業を実施する際、現状では事業実施後の河床変動や土砂の堆積域の粒度分布等を予測することが難しく、具体的な対策を検討しづらい状況にある。そこで、本研究では、固定床河川の水理特性や河道内物理環境の違いに応じた環境修復技術を検討するにあたっての基礎情報を得ることを目的とし、移動床と固定床が混在する場を対象に、1) 水路実験による移動床と固定床における流砂の伝播速度の違い、2) 水路実験による移動床と固定床の混在する場の動的平衡河床の不可逆性の確認、および数値解析による現象の再現と流砂・河床変動特性の検討を実施した。

本章の構成は以下のとおりである。まず、4.2 節では、移動床と固定床を流れる流砂の伝播速度の違いを次の2つの水路実験から確認する。1つ目の実験は、移動床水路と固定床水路のそれぞれに同量の給砂を与えた後、給砂した砂礫が下流へ輸送される伝播速度を比較するものである。2つ目の実験は、固定床水路のみを対象とし、総給砂量を統一した上で単位時間あたりの給砂量のみを変化させることで、給砂方法の違いが流砂の伝播速度に与える影響を検討するものである。次いで、4.3 節では、移動床と固定床が混在する場を対象とし、水路実験から両河床の間に動的平衡河床の不可逆性が

存在することを確認する。その後、固定床領域を有する場の流砂特性を考慮した平面2次元河床変動解析により、水路実験で認められた動的平衡河床の不可逆性の再現性を確認すると共に、こうした現象が生じる際の流砂・河床変動特性を検討する。

4.2. 掃流砂の伝播速度の違い

4.2.1. はじめに

本節では、移動床と固定床を流れる掃流砂の伝播特性の違いを確認することを目的に、以下の2タイプの水路実験を行った。まず、一様な水理条件のもと、移動床水路と固定床水路のそれぞれに同量・同質の給砂を与え、河床材料の違いが掃流砂の伝播速度に与える影響を把握する。次いで、固定床水路のみを対象とし、総給砂量を統一したうえで固定床に与える単位時間あたりの給砂量のみを変化させることで、給砂方法の違いに応じて固定床の一部に移動床領域が形成されることによる流砂の伝播速度の変化について検討する。

4.2.2. 実験方法

(1) 実験水路

実験水路の概要を図4.2.1に示す。実験水路は全長21m、幅0.5m、勾配0.0012の長方形断面矩形水路とした。実験水路の河床は、固定床水路を用いる場合は平均粒径 $d_m = 0.53\text{mm}$ の一様砂（図4.2.2）を油性ペンキで2層に張り付けたベニヤ板を水路床に張り付け（図4.2.3）、移動床水路を用いる場合は平均粒径 $d_m = 0.53\text{mm}$ の一様砂を水路全面に敷き詰めるものとした。実験に用いた給砂材料は、河床材

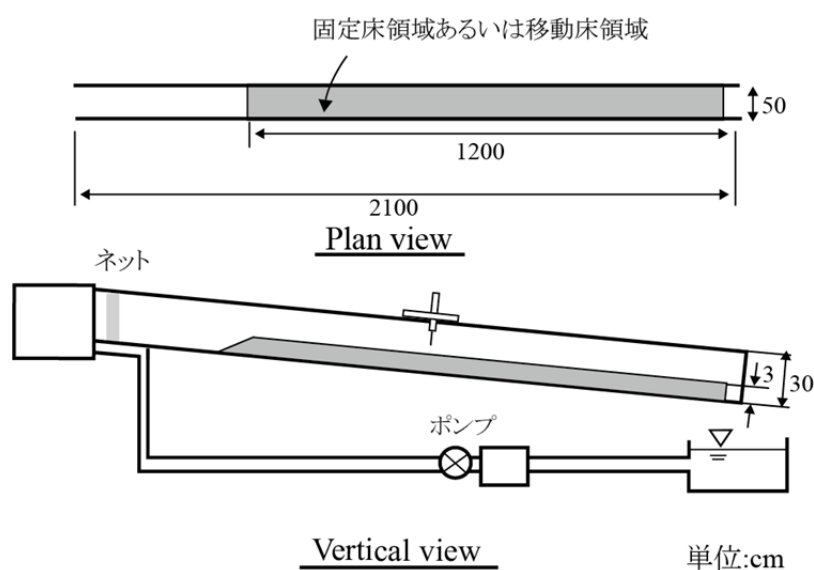


図 4.2.1 実験水路の概要

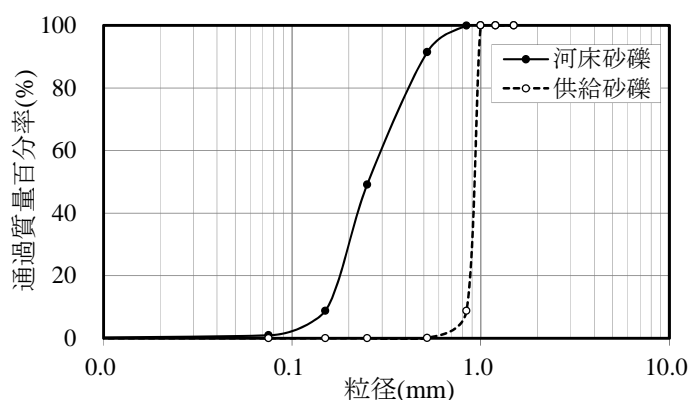


図 4.2.2 河床材料と給砂材料の粒径加積曲線

図 4.2.3 平均粒径 $d_m = 0.53\text{mm}$ の一様砂を貼り付けたベニヤ板(固定床領域はツヤ無し黒色に着色)

料よりも大きい平均粒径 $d_m = 1.08\text{mm}$ の均一砂（図4.2.2）とし、固定床下流端から5.2m上流地点を給砂投入点とした。給砂材料が河床材料より大きい理由は、移動床河床に給砂した砂礫の伝播速度を、水路縦断方向における河床材料の粒度分布変化から把握するためである。この他、水路下流端には水深を等流水深に調節するためのゲート、および流砂を捕捉するための採砂箱を設置した。

(2) 実験条件

実験の水利条件を表 4.2.1 に示す。水利条件は全ての実験を通して定常流量とし、黒木・岸⁽⁹⁾による中規模河床波が形成されない水利領域（図 4.2.4）に設定した。これは、水路下流端から流出する流砂量の測定値が出来る限り河床波の影響を受けないようにするためである。

実験条件を表 4.2.2 に示す。表 4.2.2 の実験ケース名は、MB が移動床実験を、FB と F が固定床実験を表している。まず、Case MB と Case FB は、移動床と固定床を流れる流砂の伝播速度の違いを比較するものである。このため、一定の水利条件のもと、移動床水路と固定床水路に同量・同質の給砂を行っている。給砂は、実験開始時に給砂投入地点にて河床材料よりも粒径の大きい平均粒径 1.08mm の一様砂 300cm^3 （ $\approx 800\text{g}$ ）を置土状に与え、その後、移動床河床における同じ粒径の一様砂の平衡掃流砂量 $Q_b = 0.5\text{ cm}^3/\text{s}$ （給砂投入点付近が河床低下しない程度。）与え続けるものとした（表 4.2.2）。

一方、Case F-1～Case F-4 は、固定床水路に与える給砂方法の違いが流砂の伝播速度に及ぼす影響

表 4.2.1 水理条件

水理条件	
流量 Q (m ³ /s)	0.01524
水路幅 B (m)	0.5
水路床勾配 I_b	0.0012
固定床水路の等流水深 H_0 (cm)	7.3
$BI^{0.2}/H_0$	1.78
河床材料の平均粒径 d_m (mm)	0.53
給砂材料の平均粒径 d_m (mm)	1.08

表 4.2.2 実験ケース

実験 ケース	河床 材料	初期の土砂 供給量(cm ³)	給砂量 Q_b (cm ³ /s)	給砂継続 時間(min.)	測定時間 (min.)	総給砂量 (cm ³)
MB	移動床	300	0.5	30	1,5,10,20,30,40,50	330
FB	固定床	300	0.5	20	1,5,10,20	320
F-1	固定床	0.0	0.5	30	1,5,10,20,30,80	900
F-2			1.0	15	1,5,10,20,30,80	900
F-3			2.52	6	1,5,10,20,30,80	900
F-4			30.2	0.5	1,5,10,20,30,80	900

を把握するものである。このため、各実験にて給砂の総量を 900cm³ (≒2400g) に統一したうえで、少量ずつ時間をかけて給砂する Case F-1 から、一度に置土状に与える Case F-4 まで給砂方法を変化させた。まず、Case F-1 は、給砂投入地点から Case MB と同量の給砂（移動床の平衡掃流砂量）を 30 分経過するまで与え続けたものである。Case F-2 は、Case F-1 の 2 倍の給砂量を実験開始から 15 分経過するまで与え続けたものである。Case F-3 は、Case F-1 の 5 倍に相当する給砂量を実験開始から 6 分経過するまで与え続けたものである。最後に、Case F-4 は、Case F-1 の 60 倍に相当する流砂量を実験開始時に一度に与えたものである。なお、Case F-3 と Case F-4 は、本実験の水理条件下における固定床の堆積限界掃流砂量よりも多い給砂量に相当する。堆積限界掃流砂量とは固定床を流れ得る最大の掃流砂量であり、この値を境に固定床上に土砂が堆積し始める。本実験では、この固定床の堆積限界掃流砂を芦田・道上¹⁾から求めた。

(3) 測定項目

実験は、表 4.2.2 に示す測定時間ごとに終了した。実験終了後、移動床実験では、水路下流端に流出した土砂を回収して乾燥させた後、フルイで粒径 1.00mm 以上の砂礫のみを選び分け、水路下流端まで到達した給砂材料の乾燥重量を測定した。また、給砂材料が水路下流端まで伝播する速度を把握するため、給砂投入点から下流に向かって 50cm 間隔で水路中央部の河床材料を採集し、その粒度分布を測定した。河床材料の採集法は、河床表面に 6.0×6.0cm の金属枠を設置し、その枠内の河床材料を小さなヘラを使って約 5mm の深さまで取るようにした。ただし、目視で粒度分布が明らかに変化すると分か

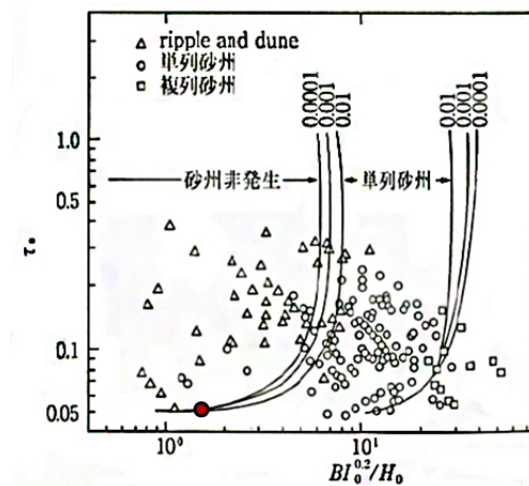


図 4.2.4 交互砂州の形成領域(黒木・岸⁹⁾)と本実験の水理条件(赤丸)

る地点では、河床材料の採取と粒度分布の測定を追加で行なっている。

一方、固定床実験では、水路下流端にて流出した土砂を回収して乾燥重量を測定すると共に、固定床上に形成された河床地形の河床位を測定した。

4.2.3. 結果と考察

(1) 移動床と固定床の流砂の伝播速度の違い

図 4.2.5 に、Case MB (移動床) と Case FB (固定床) の水路下流端における累積流砂量 Q_b を示す。ここで示す流砂量は、給砂材料である粒径 1mm 以上の土砂にのみ着目したものである。また、図 4.2.6 に、Case MB の水路中央部における河床材料の平均粒径の縦断変化を示す。Case MB では河床材料よりも粒径の大きい給砂材料を用いているため、図 4.2.6 に認められる粒度分布の変化点は給砂材料の下流方向への到達点を表している。この他、図 4.2.7 に Case MB の実験開始から 30 分後の河床、および Case FB の 1 分後の河床の様子を示す。

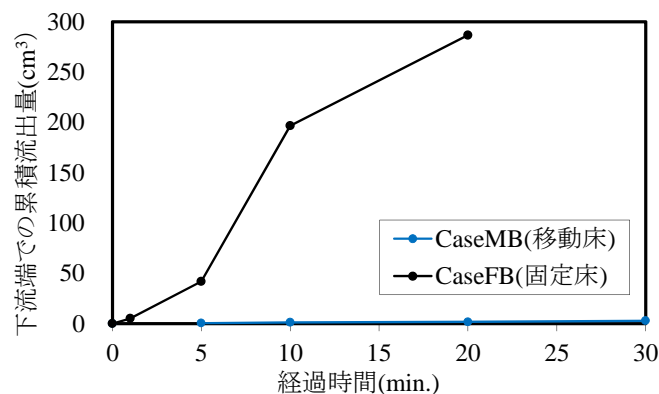


図 4.2.5 CaseFB と CaseMB の水路下流端における単位時間あたりの流砂量 Q_b ($d_m = 1.08\text{mm}$)

図 4.2.5 に示すように、Case MB と Case FB では、給砂材料が水路下流端から流出するまでの時間が全く異なっていた。固定床水路である Case FB では、実験開始からわずか 1 分ほど経過した時点で給砂材料の一部が水路下流端から流出した。一方、移動床河床である Case MB では、実験開始から

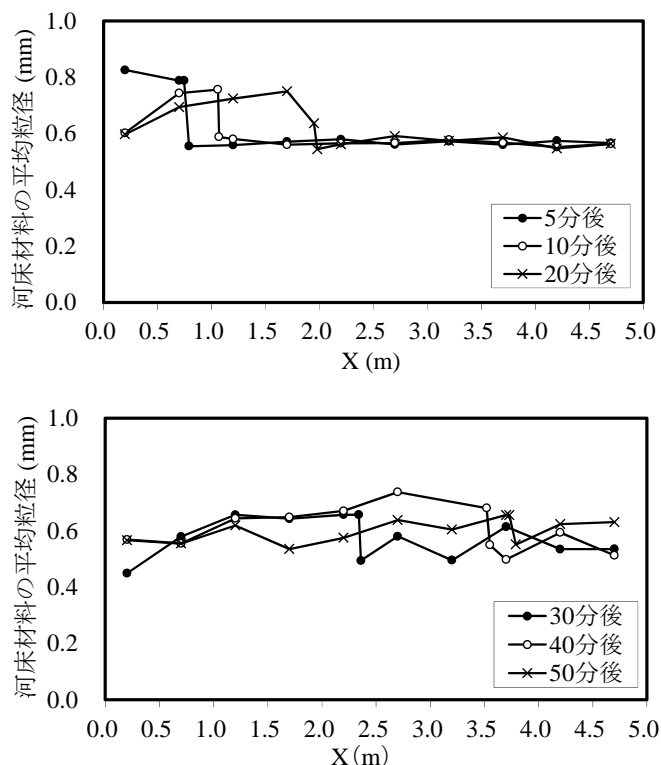


図 4.2.6 Case MB の水路中央における河床材料の平均粒径の縦断変化,
上図)実験開始から 5 分～20 分経過後, 下図)実験開始から 30～50 分経過後

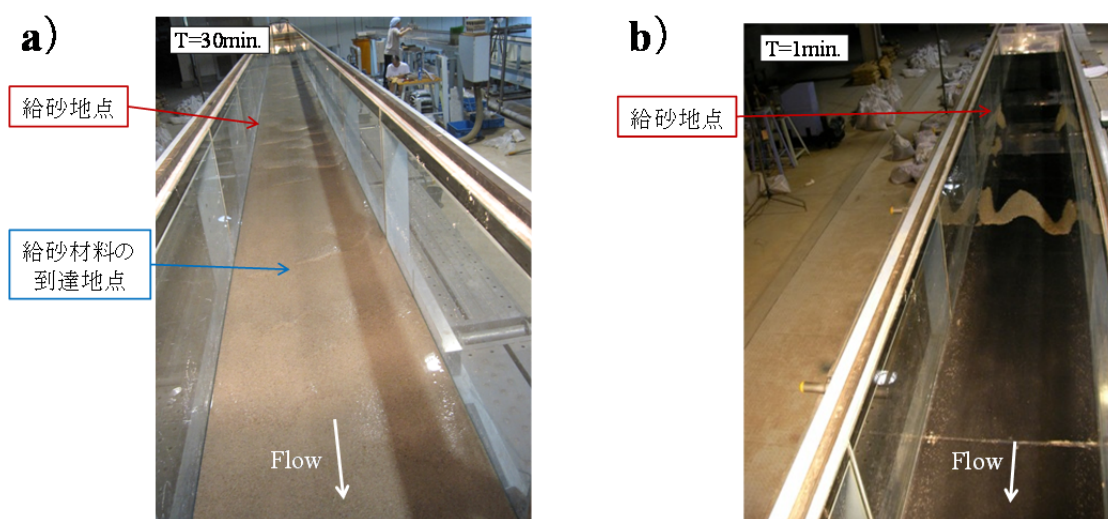


図 4.2.7 a) Case MB の河床の様子(実験開始から 30 分経過後),
b) Case FB の河床の様子(実験開始から 1 分経過後)

30分経過しても給砂材料が全く水路下流端から流出しなかった。そこで、図4.2.6よりCase MBにおける給砂材料の伝播速度を詳しく見ると、Case MBでは河床材料の粒度分布の縦断変化の速度が非常に遅く、実験開始より50分経過しても上流から給砂した砂礫が水路下流端まで到達しなかったことが分かる。つまり、移動床と固定床では流砂の伝播速度が大きく異なり、固定床水路を流れる砂礫の方が下流へと速やかに輸送されるようである。これは、固定床水路と異なり、移動床水路では給砂された砂礫が河床材料と混合しながらゆっくり下流に伝播するためと考えられる。

(2) 固定床水路の流砂の伝播速度と河床地形の変化

図4.2.8に、総給砂量を統一したうえで、単位時間あたりの給砂量を変化させたCase F-1～Case F-4における水路下流端での給砂材料の累積流出量の時間変化を示す。ここで示す累積流出量は、給砂した土砂の何割が流出したのかを確認するため、累積給砂量で無次元化されている。また、図4.2.9～図4.2.12に、Case F-1～Case F-4の時間経過に伴う河床変動量の平面分布を示す。

図4.2.8によると、流砂の伝播速度は、一度に多量の土砂を与えたCase F-4で最も遅く、Case F-3、Case F-2とCase F-1と速くなったことが分かる。つまり、堆積限界掃流砂量よりも少ない給砂を与えたCase F-1およびCase F-2に比べ、Case F-4のように堆積限界掃流砂量よりも多い給砂を固定床水路に一度に与えた場合、上流からの給砂量が増えたにも関わらず、逆に砂礫が下流に輸送されにくくなるようである。これは、少しずつ給砂したCase F-1およびCase F-2では、流砂が流れに与える影響が小さく、ほぼ等流状態の流れ場の流体力を受けて砂礫が下流に流下されること、および本実験条件では固定床水路と砂礫との摩擦角が移動床水路と砂礫との内部摩擦角より小さいため、掃流砂の伝播が速くなったものと考えられる。実際、図4.2.9および図4.2.10にてCase F-1とCase F-2の河床変動の様子を確認すると、両ケースは給砂を与え続けても実験中に固定床上に土砂の堆積域が殆ど形成されていない。これより、Case F-1とCase F-2では、給砂した砂礫の大部分が固定床上に留まることなく水路下流端まで輸送されたことが分かる。

一方、固定床水路に堆積限界掃流砂量よりも多い給砂を一度に与えたCase F-3とCase F-4では、図4.2.11および図4.2.12に示すとおり、固定床水路の一部に土砂の堆積域（移動床領域）が形成されている。これは、固定床上に形成された移動床領域では、流砂は河床材料と交換しながら輸送されるため、河床と砂礫との内部摩擦角が大きくなり、掃流砂の輸送速度が遅くなったものと考えられる。こ

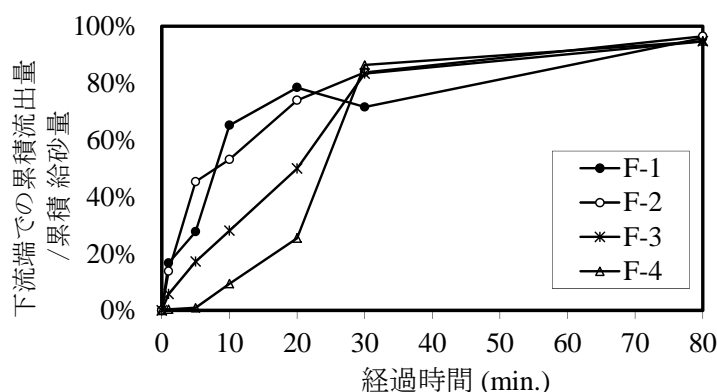


図 4.2.8 Case F-1～Case F-4 における水路下流端での土砂の累積流出量

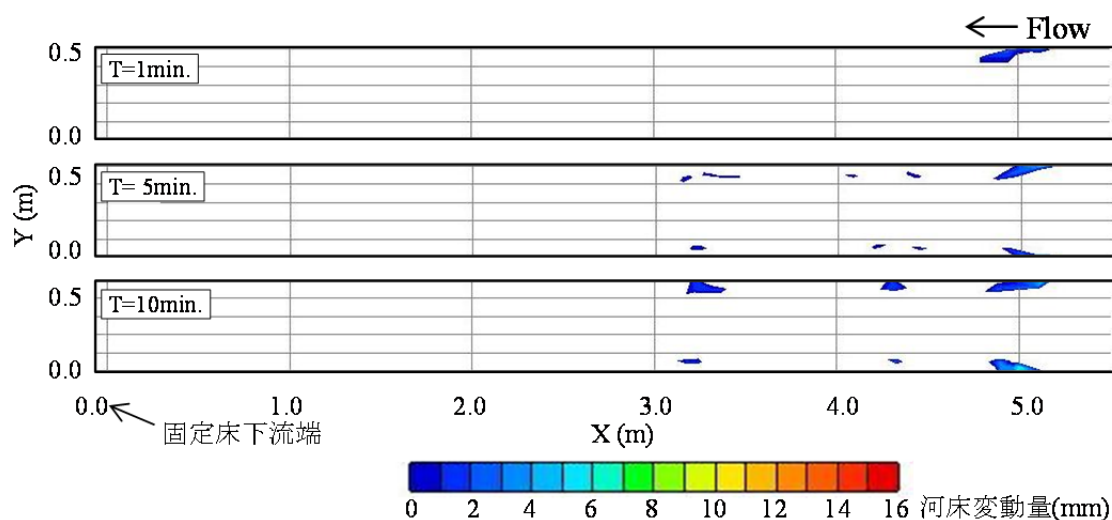


図 4.2.9 CaseF-1 における時間経過に伴う河床変動量

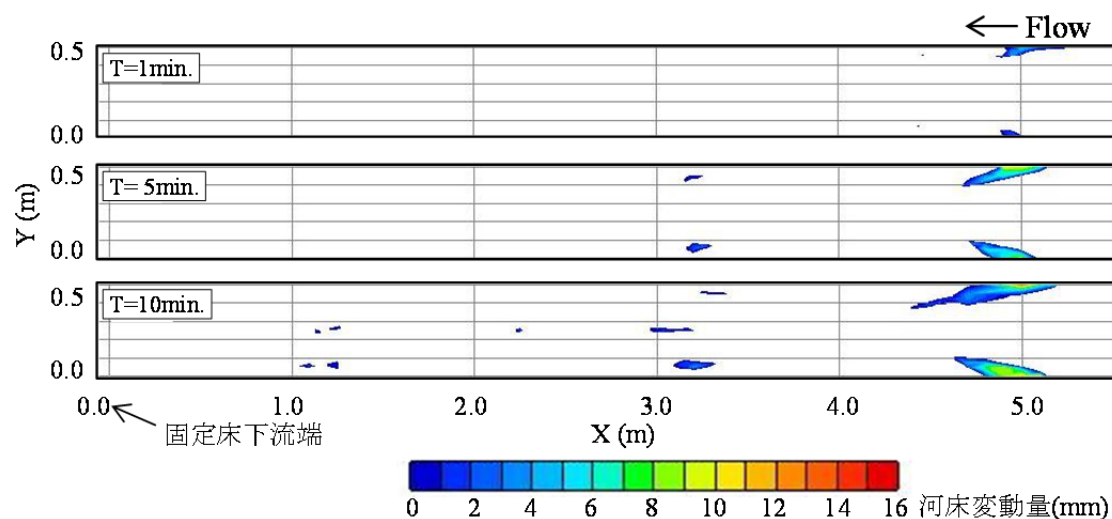


図 4.2.10 CaseF-2 における時間経過に伴う河床変動量

の他、実験中の目視によると、固定床上に堆積した移動床領域の下流端（固定床との境界部分）では、流れの剥離によって流砂が剥離域に取り込まれながら下流に伝播する様子も確認されている。CaseF-3、とくに CaseF-4 では、こうした流れ場の水理特性の変化によって、上流から与えた給砂量が増えたにも関わらず CaseF-1 や CaseF-2 に比べて給砂材料の水路下流端までの伝播速度が遅くなったものと考えられる。

ただし、固定床上に形成された移動床領域は、図 4.2.11 および図 4.2.12 によると地形上流端から横断方向に周期性のある地形を形成しながら浸食され、実験開始より 30 分経過後にはいずれのケースも固定床水路上に移動床領域が殆ど存在していない。このような横断方向の周期性は、固定床水路に形成される強い縦渦の影響の可能性が考えられる。実際、実験中の目視によると移動床領域の上流側から始まる浸食は、移動床下流端まで到達して地形が縦断的に分割されるほど加速されるようであっ

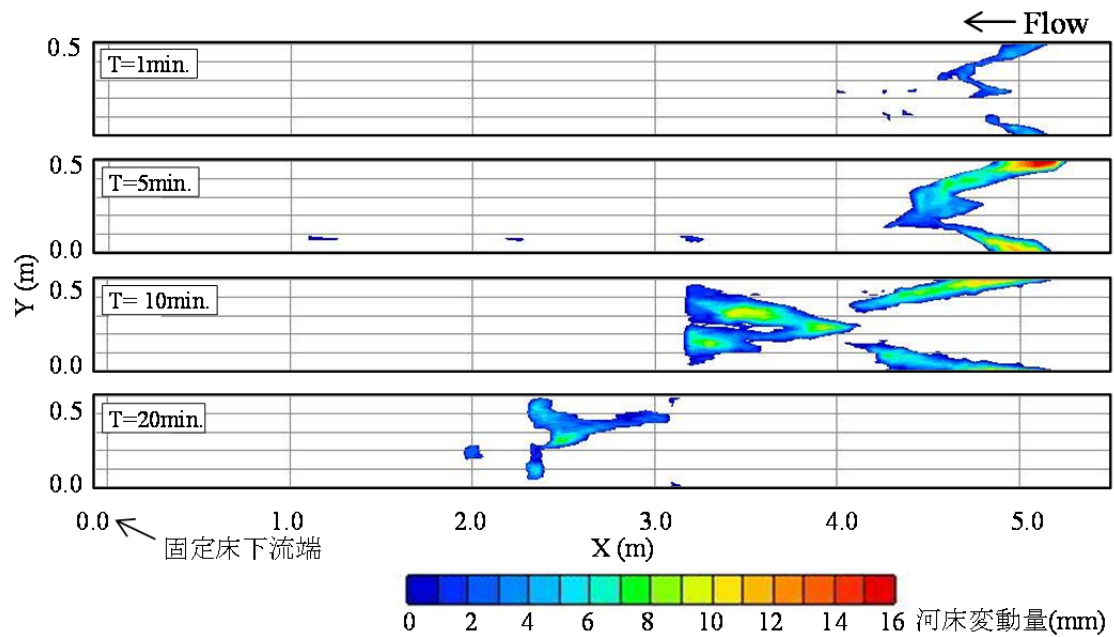


図 4.2.11 CaseF-3 における時間経過に伴う河床変動量

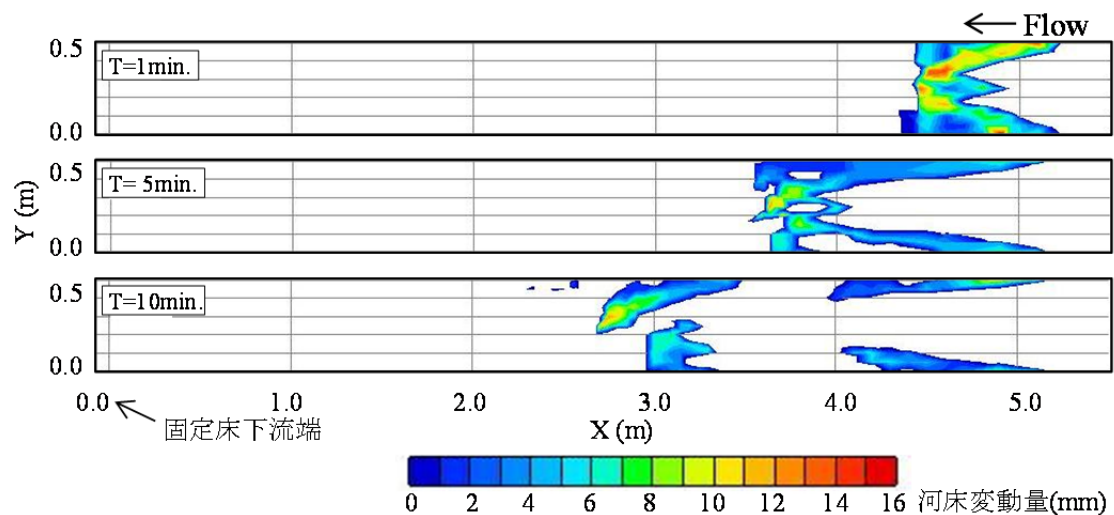


図 4.2.12 CaseF-4 における時間経過に伴う河床変動量

た。つまり、固定床水路に置土のように多量の土砂を一度に与えたとしても、移動床領域は時間経過と共に地形上流側からの浸食によって水路縦断方向に分断され、移動床領域の規模が小さくなるほど浸食速度が速くなるものと推察される。

4.2.4. 結 語

本研究では、移動床と固定床が混在する場合における掃流砂現象の違いを確認することを目的に、水路実験により、移動床水路と固定床水路の流砂の伝播特性を比較した。これより、以下に示す結論

を得た。

- (1) 移動床水路と固定床水路に同量・同質の給砂を与えた場合、固定床水路ほど流砂の伝播速度が速くなる。これは、移動床水路では流砂が河床材料と交換しながら輸送されるため、固定床水路に比べて流砂がゆっくりと水路下流へと伝播するためである。
- (2) 固定床水路にて、総給砂量を統一したうえで単位時間あたりに与える給砂量を変化させた場合、流砂の下流への伝播特性は固定床の堆積限界掃流砂量を境にして変化する。固定床水路へ与える流砂量が堆積限界掃流砂量より少ない場合、与えた砂礫は給砂量に関係なく短時間で下流端まで輸送される。一方、固定床水路に堆積限界掃流砂量より多い給砂を一度に与えた場合、固定床水路の一部に移動床領域が形成され、流砂の伝播速度が遅くなる。しかしながら、固定床に囲まれた移動床領域は地形上流側からの浸食によって水路縦断方向に分断されやすく、移動床領域の規模が小さくなるほど浸食速度が速くなり比較的短時間で消失するようである。

参考文献

- 1) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，206，pp.59-69，1972.
- 2) 岡部健士・穴瀬康雄・山下秀基：滑面固定床上における堆積限界掃流輸送量，水工学論文集，38，pp.633-640，1994.
- 3) 江頭進治・芦田和男・中島智彦：管路における土砂輸送機構，水工学論文集，34，pp.553-558，1990.
- 4) 江頭進治・吉栖雅人・伊藤隆郭：固定床開水路における砂礫の輸送形態と輸送能力，水工学論文集，40，pp.971-976，1996.
- 5) 竹林洋史・江頭進治・金海生：交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級，水工学論文集，41，pp.895-900，1997.
- 6) Takebayashi, H., Okabe, T. and Shinozaki Y.: Geometric Characteristics of Bars on Layers with Rocks or Cohesive Material, Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation, pp.267-277, 2007.
- 7) Luu, L. X., Egashira, S. and Takebayashi, H.: Investigation of Tan Chau Reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE, 48, pp.1057-1062, 2004.
- 8) 早川博・宮本大・夏井皓盛：屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究，水工学論文集，55，pp.781-786，2011.
- 9) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，586，pp.39-50，1984.

4.3. 動的平衡河床の不可逆性と掃流砂・河床変動特性

4.3.1. はじめに

河床から土砂の堆積層が消失した固定床領域を有する河川は、河床低下や砂利採取に伴う露岩河川、治水・利水機能の向上を目的とするコンクリート三面張り河川など全国各地に分布している。固定床領域では砂礫と河床の間の摩擦角が移動床領域よりも小さく、掃流砂は固定床上を停止せずに輸送されやすい。そのため、一度固定床化の進行した河床には土砂が自然と堆積し難く、流れの平滑化に伴う河道内物理環境の単調化やそれに伴う水圏生態系の劣化等が懸念されている^{1), 2)}など。こうした背景から、近年、固定床領域を有する河川の河道内物理環境を多様化させることを目的とし、河道の一部に土砂を堆積させるための環境修復事業が各地で実施されつつある^{3), 4), 5)}など。しかし、移動床、あるいは固定床のみを対象とした流砂・河床変動特性に関する研究は多数存在するものの^{6), 7), 8)}など、固定床領域に土砂が堆積する過程で生じる移動床と固定床が混在するような場の流砂・河床変動特性に関する知見は非常に少なく、現状では具体的な対策を立てることが難しい状況にある。

固定床領域を有する場の河床変動特性を検討した数少ない報告には、Takebayashi et al.⁹⁾や早川ら¹⁰⁾がある。Takebayashi et al.⁹⁾は、移動床の下に固定床領域が埋没する砂州河川において、水路実験と数値解析から河床変動特性を検討している。これより、移動床河川にて固定床領域が露出した場合、固定床部分にて河床低下が抑制されるため、それに伴い砂州の波高の減少と砂州の横断方向のモードが発達すること、および移動床領域の場合よりも小さなB/Hで交互砂州と複列砂州の境界領域が出現することを指摘している。また、早川ら¹⁰⁾は、固定床河川の湾曲蛇行部では水衝部にて水面が盛り上がり流れて流れるため、移動床河川と異なり蛇行部の外岸側に土砂の堆積域が生じること、およびこの傾向は湾曲部の蛇行角が大きくなるほど無次元掃流力の偏りが大きくなるために顕著になることを報告している。しかし、これらの報告は本研究で対象とするような固定床全面に土砂を堆積させて移動床河床に戻すための給砂条件や、それに伴う河床変動特性の変化までは扱っていない。

4.2 節の検討では、固定床領域を有する場について、上流からの給砂条件とそれに伴い変化する固定床上の土砂の被覆率によって、掃流砂の輸送特性が変化することを示した。これより、このような給砂条件の違いに応じて流砂特性が変化する固定床領域では、それと同時に固定床上の河床変動特性も大きく変化しているものと推察される。しかし、このような固定床領域に与える給砂量と河床変動特性との関係性に関する報告は、固定床（露岩河床）の浸食特性に関するものが大半（後述）で、給砂量の変化に伴い固定床河床が移動床河床に戻る際の流砂・河床変動特性を扱ったものはChatanantavet and Parker¹¹⁾など非常に少ない。Chatanantavet and Parker¹¹⁾は、河床の粗度と河床勾配の異なる固定床水路を対象とし、給砂量を順に増やして移動床水路に戻る場合の河床変動特性を水路実験から検討している。その結果、固定床上の土砂の堆積プロセスや被覆率は、1) 水路床の水理学的粗度、2) 給砂量、3) 河床勾配の3要因から影響を受けることを指摘している。その中でも、固定床河床の河床勾配の影響は大きく、急勾配（ $I_b \geq 0.0115$ ）と緩勾配（ $I_b = 0.003$ ）では全く異なるプロセスで土砂が河床上に堆積することを示している。彼らの報告によると、急勾配の固定床河床では、

給砂量をゼロから固定床の飽和掃流砂量（事前実験から把握した河床全面が移動床に戻る土砂供給量、capacity sediment transport rate）まで順に増やした場合、給砂量が増えたにも関わらず固定床上に土砂の堆積が生じない状態が続く、給砂が飽和掃流砂量にほぼ一致したとき、急速に固定床が移動床に変わり河床上昇する“runaway alluviation”と呼ばれる現象が生じている。一方、緩勾配の固定床河床では、給砂量の増加に伴い土砂の被覆率が線形的に増加し、給砂量が飽和掃流砂量とほぼ一致するときに移動床河床に戻る“gradual alluviation”が生じている。さらに、水路床の水理学的粗度が大きい、あるいは固定床上に縦筋状の侵食領域が形成されるような緩勾配の固定床河床では、給砂量が少ない間も部分的に土砂が堆積しやすいため、給砂量の増加に伴う土砂の被覆率が線形的に増加しないタイプの“gradual alluviation”が生じるようである。

一方、固定床を有する場に与える給砂量と河床の侵食特性（bedrock incision）との関係性についての報告は数多く存在する^{12), 13), 14)}など。これらの報告では、固定床上に土砂の堆積域（移動床領域）が存在しない場合、給砂量が増えるほど砂礫が岩床を摩耗させる侵食速度が速くなること、および給砂量がさらに増えて岩床を土砂が被覆し始めると、被覆率が大きくなるほど侵食速度が抑制されるといった、流砂量の増加が侵食速度に対して2つの異なる役割を果たすことが明らかとされている。その中でも、井上ら¹⁴⁾は固定床上の流砂の輸送と侵食速度を考慮した平面2次元数値解析から、同一の水理条件下で給砂量のみを変化させた場合の固定床上の河床変動と侵食特性について検討している。その結果、固定床水路に与える給砂量が飽和掃流砂量よりも少ない場合、固定床上の交互砂州の蛇行波長は長くなり明瞭な交互砂州が形成されなくなる、あるいは砂礫によって殆ど被覆されない状況になるため、流砂が縦筋状に集中して流れて侵食の集中する場所が生じることを指摘している。

このように、固定床領域を有する場に与える給砂量と河床変動特性との関係性に関する報告は幾つか存在する。しかしながら、本研究で対象とするような固定床領域全面を移動床河床に戻すために必要となる土砂量、あるいは固定床領域の露出状況の違いに伴う流砂・河床変動特性などに関する知見は十分に得られていない。そこで、本研究では、固定床を有する場に与える給砂量を順に変化させることによる流砂・河床変動特性の変化を把握することを目的に、水路実験と数値解析を行った。水路実験では、同一の水理条件のもとで固定床の有無と給砂条件のみを変化させ、実験開始時の河床の状態が動的平衡河床に与える影響を確認した。これより、移動床のみの場と移動床と固定床が混在する場との間には「動的平衡河床の不可逆性」が存在し、一度広域的な固定床領域が形成されると簡単にはもとの移動床のみの場に戻れないことを示した。次いで、固定床が流し得る最大の掃流砂量である堆積限界掃流砂量（the maximum rate of bed-load transport rate on fixed bed）を考慮した平面2次元河床変動解析を行い、水路実験で確認された動的平衡河床の不可逆性の再現性を検証すると共に、こうした現象が生じる際の流砂・河床変動特性について考察した。

なお、移動床と固定床が混在する場では、その場所の土砂の存在率に応じて流砂量が時空間的に変動する非平衡場が形成される。このような掃流砂の非平衡性を、竹林ら^{9), 15)}と旭・清水¹⁶⁾はいずれも固定物の上に砂礫の移動層を仮定し、固定床上の掃流砂量を補正することで従来の河床変動解析の枠組みの中での簡易に取り扱う方法を提案している。これらのモデルでは、移動床の下に固定床領域が埋没するような場や移動床と固定床が混在するような場の流砂・河床変動特性をある程度再現している。しかし、両モデルはいずれも固定床が流し得る最大の掃流砂量である堆積限界掃流砂量が同一

水理条件下の移動床の平衡掃流砂量よりも大きな値になることまでは考慮されていない。したがって、これらのモデルをそのまま今回対象とする現象（固定床領域に土砂が堆積して移動床のみの場に戻る）に適用した場合、固定床が移動床河床に戻る際の土砂量や河床変動量を過大評価する可能性がある。そのため、本研究では固定床を有する場の流砂・河床変動を計算する方法として竹林ら^{9), 15)}の掃流砂層モデルを適用したうえで、固定床上から土砂の堆積層が失われた計算地点にのみ芦田・道上⁶⁾による固定床滑面水路の堆積限界掃流砂量を算定する掃流砂量式を導入した。これより、同一の水理条件下において、固定床と移動床で流し得る掃流砂量が異なることを考慮できるようにした。

4.3.2. 実験方法

(1) 実験水路

実験水路の概要を図 4.3.1 に示す。水路は全長 10m，水路幅 0.2m，勾配 1/150 の長方形断面矩形水路とした。実験水路の河床は，図 4.3.1 に示すとおりの給砂地点より 3.5m までの区間を移動床領域，3.5m

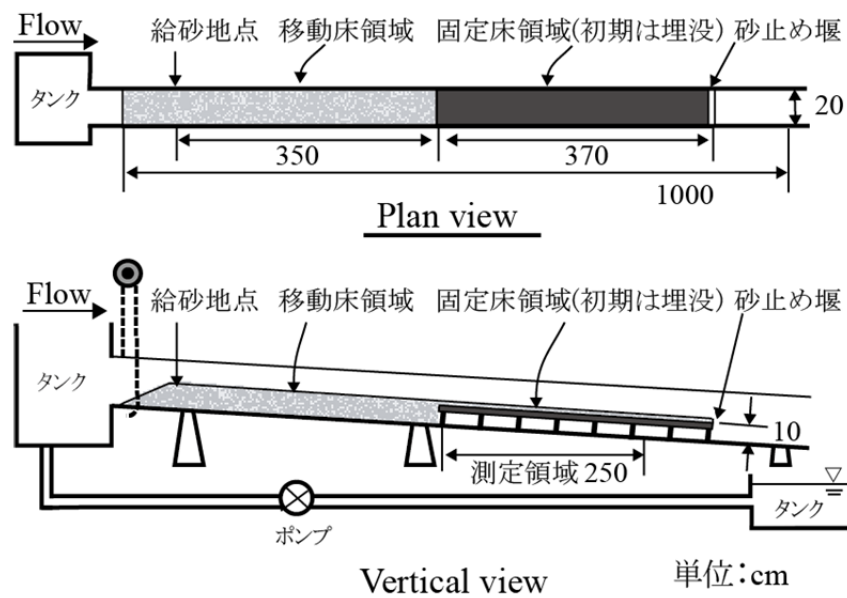


図 4.3.1 実験水路概要

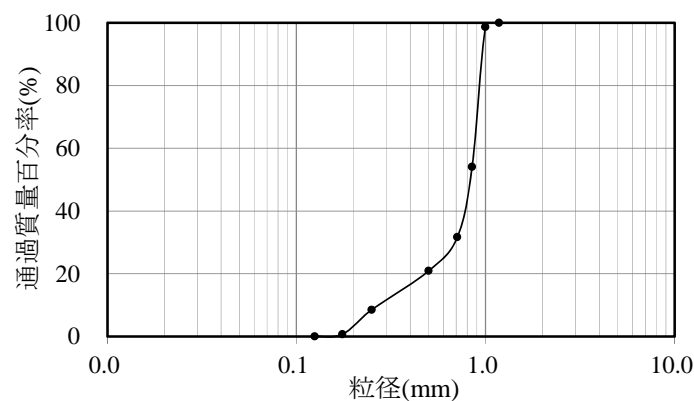


図 4.3.2 水路実験に用いた河床材料と給砂材料の粒径加積曲線

～7.2m の区間を固定床領域とした。固定床領域は、水路床より 10cm 嵩上げた位置にベニヤ板を貼り付けて作成した。この固定床領域のベニヤ板には砂等を張り付けず、滑面固定床とした。また、ベニヤ板には油性のツヤなし黒色ペンキを塗り、土砂の堆積状況を確認しやすいようにした。実験水路の初期河床（後述する Case 1 と Case 2）は、固定床領域の下流端に高さ 3mm の砂止め堰を設置し、この砂止め堰の高さまで土砂を敷き詰めたものとした。実験に用いた河床材料は、細砂を取り除いた平均粒径 0.895mm の一様砂とした。河床材料の粒径加積曲線を図 4.3.2 に示す。この他、水路下流端には等流水深を保つための柵を設置した。

(2) 実験条件

実験の水利条件を表 4.3.1 および図 4.3.3 に示す。図 4.3.3 は、本実験の水利条件を中規模河床形態の形成領域区分図 (13) の上にプロットしたものである。実験は、全てのケースを定常給水条件で行った。本実験条件下における等流水深は、移動床領域において約 2.0cm，流砂の存在しない固定床領域において約 1.36cm，移動床の平衡掃流砂量程度が流れる固定床領域において約 1.52cm であった。給

表 4.3.1 水利条件

水利条件		
流量 Q (m ³ /s)		0.00143
水路幅 B (m)		0.2
水路床勾配 I_b		1/150
河床材料, 給砂材料の平均粒径 d_m (mm)		0.895
移動床領域	等流水深 H_0 (cm)	2.0
	Fr	0.80
	無次元限界掃流力 τ_*	0.075
	$BI_b^{0.2}/H_0$	3.67
固定床領域	等流水深 H_0 (cm)	1.36
	Fr	1.43

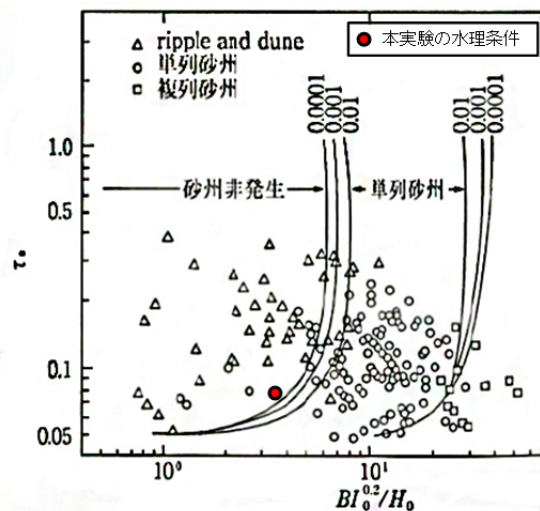


図 4.3.3 中規模河床形態の形成領域区分図⁽¹⁷⁾における水路実験の水利条件

表 4.3.2 実験ケース

実験 ケース	実験開始時 の河床	実験開始時 の河床勾配 I_b	給砂量 q_b / Case 1 の平衡掃流砂量 q_{bs}	下流端の 砂止め堰
Case 1	移動床	1/150 (=0.00687)	1.0	有り (堰高 3mm)
Case 2			0.5	
Case 3	固定床	1/150 (=0.00687)	1.0	
Case 4			1.5	
Case 5			2.0	
Case 6			2.5	
Case 7	移動床	0.00973	2.0	
Case 8		0.00867	1.5	
Case 9		0.00766	1.15	
Case 10	固定床	1/150 (=0.00687)	1.0	無し
Case 11			1.5	
Case 12			2.0	
Case 13			3.0	

砂材料は河床材料と同質の一樣砂とし、図 4.3.1 に示す給砂地点から連続的に与え続けた。

実験ケースを表 4.3.2 に示す。Case 1 は、初期河床（移動床）の状態から実験を開始し、本水理条件下の移動床の平衡掃流砂量に相当する給砂を与えたものである。Case 2 は、Case 1 と同じく初期河床の状態から実験を開始するが、給砂量を Case 1 の 0.5 倍に変えたものである。Case 3～Case 6 は、Case 2 終了後の固定床領域が全面露出した状態で、給砂量を Case 1 の 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍と各々変えたものである。これらのケースでは、給砂条件の違いが移動床と固定床の混在する場の河床変動に与える影響を確認するため、毎回河床をつくり直し、同じ河床条件から実験を開始した。Case 7～Case 8 は、Case 6 の実験終了後（固定床領域は土砂で覆われた移動床のみの場となった）、給砂量を Case 1 の 2.0 倍、1.5 倍、1.15 倍と 3 時間経過するごとに減らしたものである。この他、Case 10～Case 13 は、Case 3～Case 6 と同じ実験条件のもと、固定床下流端の砂止め堰を外した状態で実験を実施したものである。これより、Case 10～Case 13 では砂止め堰の有無が移動床と固定床の混在する場の河床変動に与える影響を確認した。以上の水路実験より、本検討では固定床領域の有無および上流から与える給砂量の違いに応じた実験終了時の動的平衡河床の形態を把握した。

各ケースの実験時間は、実験終了時の河床が固定床と移動床が混在する場となる場合は、水路下流端から流出する土砂量の時間的な変動が大きく、動的平衡河床状態に達したかどうかの判断が難しかったため、測定領域（図 4.3.1）における土砂の被覆率が殆ど変わらなくなる時刻（本実験では 2 時間）を目安に終了するものとした。一方、実験終了時の河床が移動床のみで構成される場合は、水路上流からの給砂量と水路下流端からの流出土砂量の差が小さくなる時刻（本実験では 3 時間）を目安に終了するものとした。

各ケースの給砂量は、Case 1 の給砂量が本実験の水理条件下における初期河床の平衡掃流砂量の実測値（ $q_{bs} = 3.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）に相当するものである。表 4.3.2 に示す Case 1 の 2 倍程度の給砂量（Case

5 と Case 12) は、本実験の水利条件下における固定床の堆積限界掃流砂量の計算値 ($q_{bt} = 6.80 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) に相当するものである。堆積限界掃流砂量とは固定床が流し得る最大の掃流砂量であり、この値を境に固定床上に土砂が堆積し始める。本実験では、固定床の堆積限界掃流砂を芦田・道上⁶⁾の式 (4.1) から求めた。式 (4.1) では、完全に露出した固定床には土砂の堆積層が存在しないため、固定床滑面領域の河床近傍流速が砂粒レイノルズ数 ($= u_* d / \nu$) の関数になるように考慮されている。

$$\frac{q_{bt}}{u_* d} = \frac{\beta'}{\mu'_f} f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \quad (4.1)$$

ここに、 $q_{bt} [\text{m}^2/\text{s}]$ は単位幅あたりの固定床の堆積限界掃流砂量である。 u_* は摩擦速度、 d は給砂材料の平均粒径、 μ'_f は固定床の砂礫の動摩擦係数、 β'/μ'_f は比例定数 ($\equiv 1.0$)、 τ_* ($= u_*^2 / sg d$) は無次元掃流力、 τ_{*c} ($= u_{*c}^2 / sg d$) は無次元限界掃流力、 u_{*c} は限界摩擦速度である。限界摩擦速度 u_{*c} の評価には、芦田・道上⁶⁾ による固定床滑面領域に適するように修正された次の岩垣式を用いた。

$$\begin{aligned} 0.1063 \leq d \leq 8.260 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 8.89 d^{2/3} \\ 0.0100 \leq d \leq 0.1063 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 4.17 d^{1/3} \\ d \leq 0.0100 \text{ cm} & \quad ; u_{*c}^2 = 90 d \end{aligned} \quad (4.2)$$

式 (4.1) の $f(u_* d / \nu)$ は、高さ $z = d$ における u/u_* の値であり、式 (4.3) から求める (6)。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{0.4} \xi \left(1/2 - \sqrt{\xi^2 + 1/4}\right) + 2.5 \ln \left(2\xi + \sqrt{4\xi^2 + 1}\right) + 6.83 \quad ; f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \geq 6.83 \quad (4.3)$$

ここに、 $\xi = 0.4(u_* z / \nu - 6.83)$ であり、 \ln は自然対数、 ν は水の動粘性係数である。

実験中は、ビデオカメラを水路の上に設置し、測定領域における河床変動の様子を記録した。実験終了後は、実験水路内に溜まった水を抜き、水路の上から動的平衡河床の写真を撮影すると共に、KEYENCE 社製 LK-2000 のレーザー変位計を用いて水路中央部の縦断河床高を 5mm 間隔で測定した。その後、これらのデータを用いて測定領域の平均河床勾配、および測定領域の土砂の被覆率を次のように評価した。まず、本実験では移動床が存在する全ての実験ケースにて交互砂州が形成された。そのため、平均河床勾配の評価には測定領域内の水路中央部にて河床位の最も高い点をつないだラインの平均勾配を求めた。一方、測定領域の土砂の被覆率は、水路上部から撮影した写真を Photoshop CS6 の幾何補正機能を用いて測定領域内の 6 箇所 (端 4 点と中央部左右岸 2 点) の位置の歪みを補正した後、図 4.3.4 のように写真をグレースケール化し、解析機能を用いて測定領域内に占める黒色領域 (固定床) のピクセル数の割合を算出した。

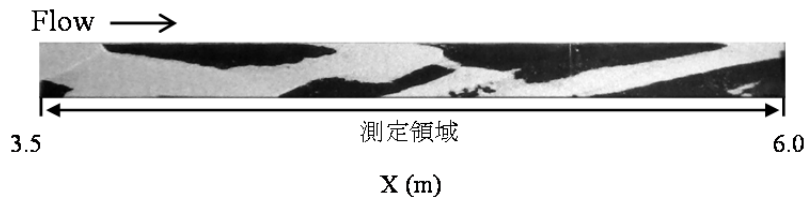


図 4.3.4 グレースケール化した写真 (Case 10), 黒色部: 固定床の露出領域を示す, 明色部: 土砂の堆積領域を示す

4.3.3. 実験結果と考察

(1) 実験終了後の動的平衡河床

図 4.3.5 に、Case 1～Case 6 の実験終了時の動的平衡河床を示す。まず、初期河床の平衡掃流砂量を与えた Case 1 の場合、図 4.3.5 a) のように動的平衡河床は移動床のままであり、波長が 1.0m～1.2m 程度の交互砂州が形成された。一方、初期河床である Case 1 の 0.5 倍の給砂量を与えた Case 2 の場合は、図 4.3.5 b) のように移動床の下に埋没していた固定床領域が全て露出した。

Case 2 終了後に実施した Case 3 では、固定床領域の露出した場に Case 1 の平衡掃流砂量に相当する土砂を給砂したにも関わらず、図 4.3.5 c) のように河床全面が移動床のみの場に戻らず、移動床と固定床の混在する場が形成された。さらに、図 4.3.5 d)～図 4.3.5 e) に示す Case 4 と Case 5 においても、Case 1 の平衡流砂量の 1.5 倍と 2.0 倍の土砂を給砂したにも関わらず、固定床領域には移動床と固定床の混在する場が形成された。本実験では、図 4.3.5 f) に示す Case 1 の平衡掃流砂量の 2.5 倍を給砂した Case 6 においてのみ、実験開始から 2 時間経過後、固定床領域の全面に土砂が堆積して移動床のみの場に戻ることが確認された。この給砂量は、本実験の水力条件下における固定床の堆積限界掃流砂量よりも十分多い土砂量に相当する。

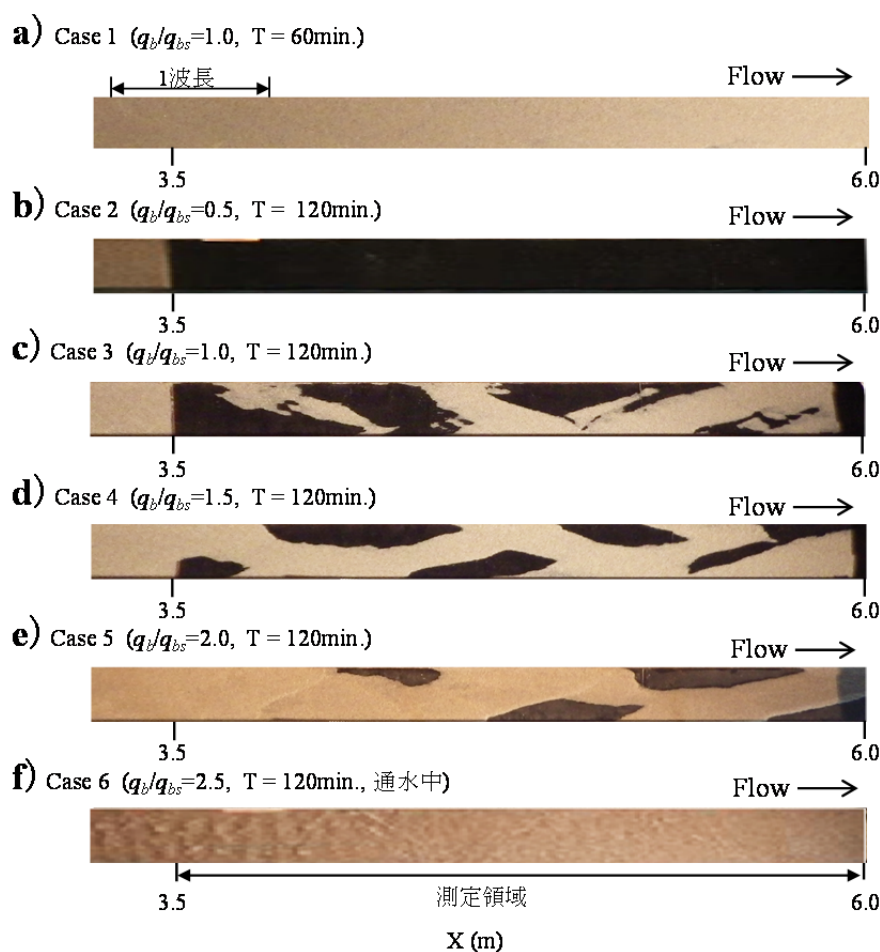


図 4.3.5 実験終了時の河床 (Case 1～Case 6), 黒色部: 固定床の露出領域を示す, 明色部: 土砂の堆積領域を示す

(2) 動的平衡河床の不可逆性

図 4.3.6 に、Case 1～Case 9 を対象とし、給砂量と実験終了時の測定領域における土砂の被覆率との関係を示す。図 4.3.6 より、Case 1～Case 9 の間には、上流から与える流量と給砂量が同じであっても河床形態に 2 つの状態が存在することが分かる。特に、図 4.3.6 の Case 1 と Case 3 に注目すると、土砂供給量の減少に伴い固定床領域が一度露出した場では、その後、上流からの土砂供給量を Case 1 の平衡掃流砂量に戻したところで移動床河床には戻らず、両ケースの間には明瞭な「動的平衡河床の不可逆性」の存在が認められる。この動的平衡河床の不可逆性とは、図 4.3.6 の赤矢印で示すように、固定床領域を有する場では、給砂量がある閾値を通過しない限り移動床のみの場に戻ることを指すものである。また、図 4.3.6 によると、Case 6 終了後に Case 7～Case 9 にて給砂量を減少させた場合、動的平衡河床は固定床と移動床の混在する場に戻らず、移動床河床の状態が維持されて

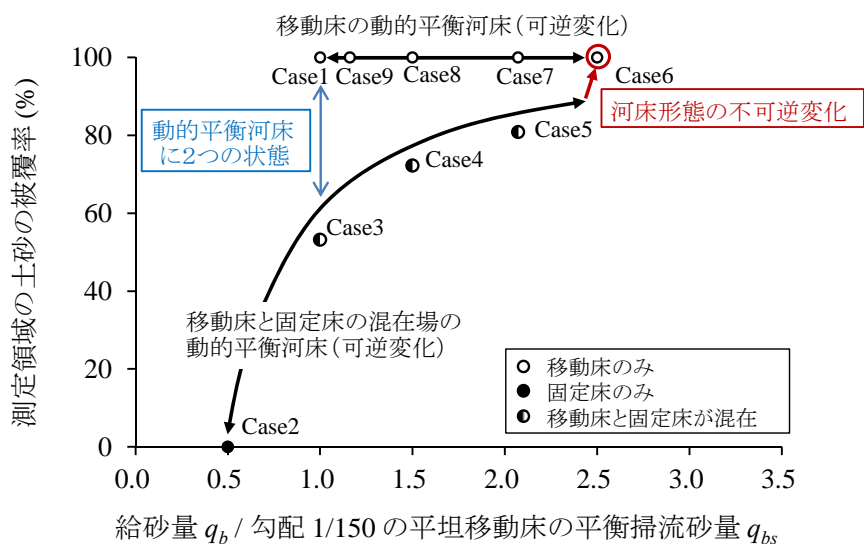


図 4.3.6 給砂量と測定領域の土砂の被覆率との関係 (Case 1～Case 9)

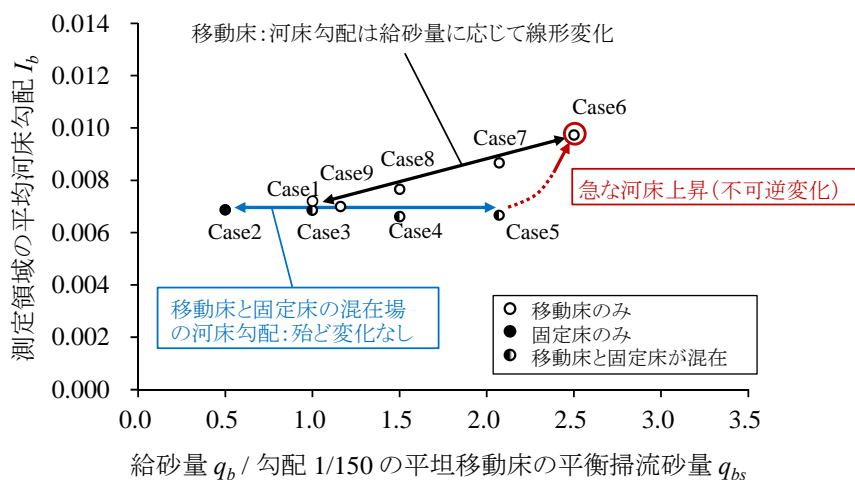


図 4.3.7 給砂量と測定領域の平均河床勾配との関係 (Case 1～Case 9)

いる。このことから、図 4.3.6 の赤矢印で示す固定床を有する場が移動床のみの場に戻る現象は不可逆的に進行するものであると分かる。

次に、図 4.3.7 に Case 1～Case 9 の給砂量と実験終了時の測定領域における平均河床勾配との関係を示す。図 4.3.7 によると、興味深い点として Case 2～Case 5 では給砂量に応じて測定領域の平均河床勾配が殆ど変化しないことが分かる。一方、実験終了時の河床が移動床のみから構成される Case 1 および Case 6～Case 9 では、測定領域の平均河床勾配が給砂量に応じて変化している。これは、移動床のみの場では、動的平衡河床の平均河床勾配が水路上流から流入する給砂量に応じて変化するためである。したがって、図 4.3.7 の赤丸で示す Case 6 では、固定床全面に土砂が堆積した直後から（動的平衡河床が不可逆的に移動床のみの場に変化した後）、河床上昇が急に生じたものと推察される。

(3) 固定床下流端に砂止め堰が無い場合

ここでは、固定床下流端の砂止め堰を外した Case 10～Case 13 についても、実験終了後の動的平衡河床の様子を図 4.3.8 に示す（Case 13 に関しては、下流端の影響で測定領域全面が移動床に戻らなかったため、3.5m～5.5m 区間を測定領域とした）。また、図 4.3.9 に給砂量と実験終了時の測定領域における土砂の被覆率との関係を、図 4.3.10 に給砂量と実験終了時の測定領域における平均河床勾配との関係を示す。

図 4.3.8 より、固定床下流端に砂止め堰が存在しない場合は、移動床のみの場と移動床と固定床の混在する場の動的平衡河床の不可逆性がかなり明瞭に生じることが分かる。とくに、図 4.3.8 にて Case 10 に着目すると、砂止め堰がない場合、上流からの土砂供給量を Case 1 の平衡掃流砂量に戻したところで固定床領域に土砂が全く堆積しない状況が認められる。

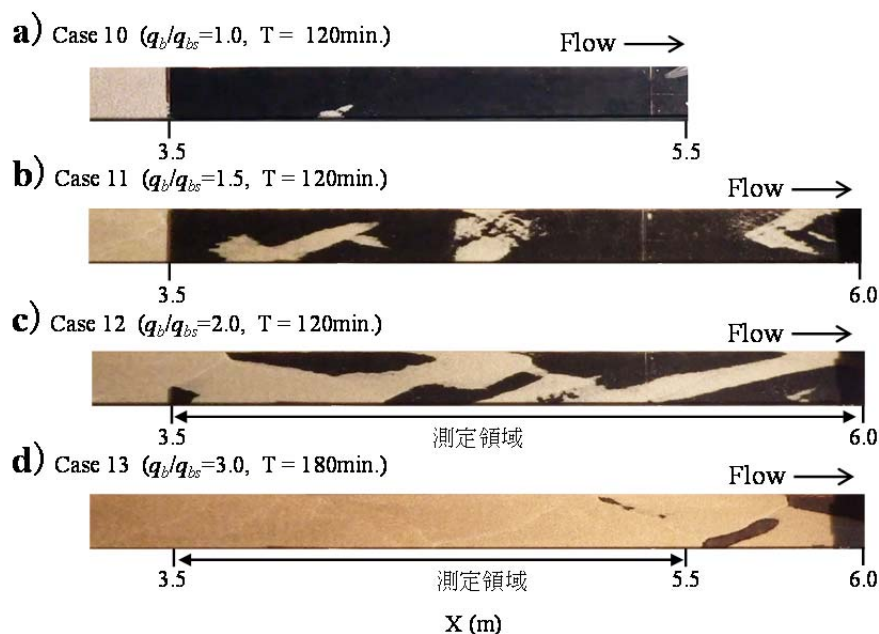


図 4.3.8 実験終了時の河床(固定床下流端に砂止め堰のない Case 10～Case 13), 黒色部: 固定床の露出領域を示す, 明色部: 土砂の堆積領域を示す

図 4.3.9 によると、砂止め堰のように固定床上の流れを遮るものを設置しない Case 10～Case 13 では、固定床上の土砂の被覆率が線形的に上昇している。これは、Chatanantavet and Parker¹¹⁾ による緩勾配 ($I_b = 0.003$) の平滑な固定床水路を対象とした実験と類似する結果である。ただし、彼らの報告では固定床河床が急勾配 ($I_b \geq 0.0115$) の場合、固定床上には交互砂州状の地形が形成されず、給砂量が飽和掃流砂量に近づいた時点で急速な移動床化と河床上昇が生じる“runaway alluviation”とよばれる現象が認められている。本検討では、実験水路の河床勾配 I_b が 0.0066 程度と Chatanantavet and Parker¹¹⁾ の報告の緩勾配河床に近かったため、彼らの検討と同様に固定床上の土砂の被覆率が線形的に増加する“gradual alluviation”が生じたものと考えられる。

そこで、次に平面 2 次元河床変動計算にて移動床と固定床の混在する場が有する動的平衡河床の不可逆性の再現を試み、このような現象が生じる理由について考察する。

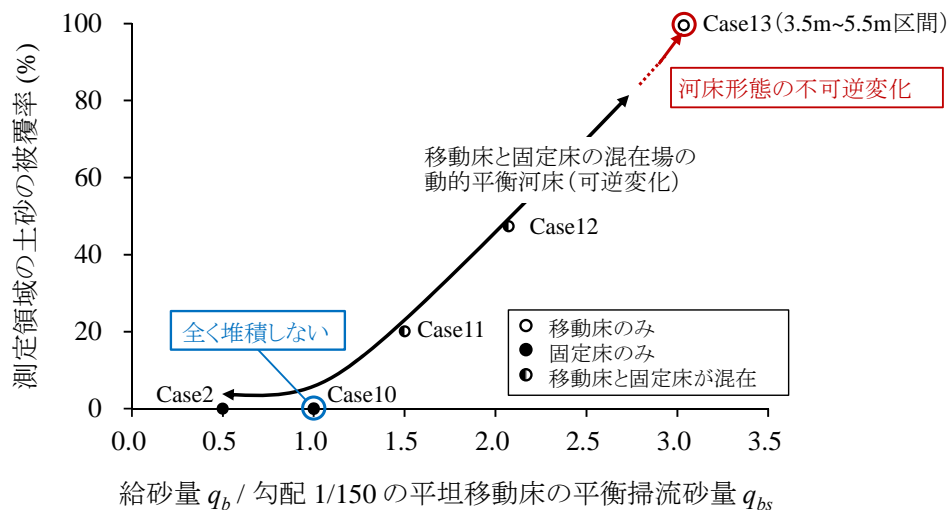


図 4.3.9 給砂量と測定領域の土砂の被覆率との関係 (Case 2, Case 10～Case 13)

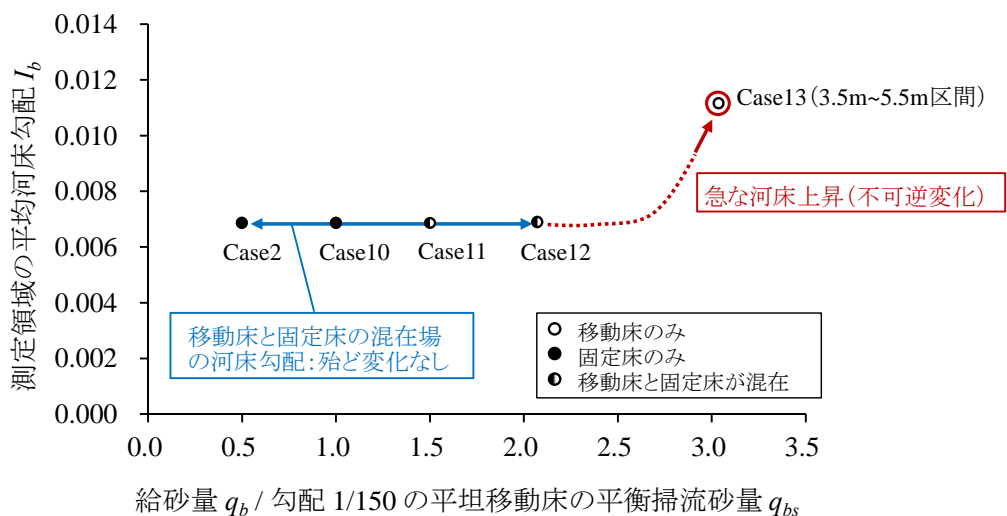


図 4.3.10 給砂量と測定領域の平均河床勾配との関係 (Case 2, Case 10～Case 13)

4.3.4. 数値解析法

水路実験で示された、移動床のみの場と移動床と固定床が混在する場との間の動的平衡河床の不可逆性は、固定床を流れる流砂の時空間的な非平衡性に起因するものと考えられる。そこで本検討では、この非平衡性を平面2次元河床変動計算で考慮する方法として竹林ら^{9), 11)}, Luu・Egashira・Takebayashi¹⁸⁾による掃流砂層モデルを適用した。また、固定床に長時間多量の土砂を与え、固定床領域に土砂が再び堆積して移動床のみの場に戻るまでの流砂・河床変動特性の検討を目的とするため、固定床上にて土砂の堆積層が失われた計算地点のみ、掃流砂層モデルの中で用いる掃流砂量の評価法として芦田・道上⁶⁾による固定床滑面領域の堆積限界掃流砂量を求める掃流砂量式を導入した。これより、同一の水利条件下であっても固定床上に土砂が堆積し始める際の堆積限界掃流砂量が移動床の平衡掃流砂量よりも大きく、両河床で流し得る最大の掃流砂量が一致しないことを考慮できるようにした。

(1) 流れの支配方程式

流れの計算には、水深平均された平面2次元浅水流方程式を用いた。流れの質量保存則を式(4.4)、運動方程式を式(4.5)および式(4.6)に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

X 軸方向：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}) \quad (4.5)$$

Y 軸方向：

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) \quad (4.6)$$

ここに、 t は時間、 x 、 y は流下方向軸と横断方向軸、 h は水深、 u 、 v は x 、 y 方向の水深平均流速、 g は重力加速度、 H は水位、 z_b は河床位高、 h は水深、 ρ は水の密度である。 τ_{bx} 、 τ_{by} は x 、 y 方向の河床せん断力であり、式(4.7)、式(4.8)で表される。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho h} = \frac{C_f}{h} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho h} = \frac{C_f}{h} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.8)$$

ここに、 $\sqrt{u^2 + v^2}$ は断面平均流速である。また、 C_f は底面摩擦係数であり、対数型抵抗則を用いると以下のように表される。

$$C_f = \frac{1}{(6.0 + 2.5 \ln(h/k_s))^2} \quad (4.9)$$

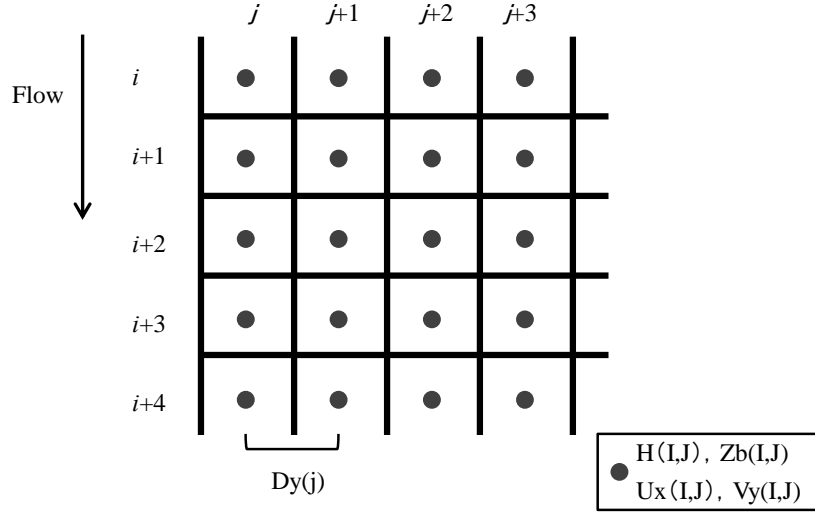


図 4.3.11 TVD-MacCormack Scheme

ここに、 k_s は河床の相当粗度であり等流水深を満たすように与えた（固定床では平均粒径の0.5倍）。式（4.7）および式（4.8）の τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} は流れの乱れ成分を表すレイノルズ応力であり、本計算では式（4.10）を用いている。

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.10)$$

ここに、 ν_t は乱流拡散係数であり、本計算では0方程式モデルである式（4.11）を用いている。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (4.11)$$

ここに、 κ はカルマン定数(=0.4)である。 u_* は対数型抵抗則⁶⁾から求める摩擦速度であり、式(4.12)を用いる。

$$\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{u_*} = 6.0 + 2.5 \ln(h/k_s) \quad (4.12)$$

平面2次元浅水流方程式の差分にはMacCormackの陽的・2段階差分法を適用し、計算メッシュを図4.3.11のように配置した。数値不安定を抑制するため、Causionモデル¹⁹⁾のTVD項を付加した。

TVD-MacCormackの陽的・2段階差分法は、式（4.13）の形式の基礎式を式（4.14）～式（4.15）のように差分化する。本差分法は予測子段階で1次精度の解を得た後、修正子段階で時間を Δt だけ後戻りさせたうえで、2次精度の解を求めるものである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = C \quad (4.13)$$

予測子段階：

$$U_{i,j}^p = U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_{i,j}^n - E_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (F_{i,j}^n - F_{i,j-1}^n) + \Delta t C_{i,j}^n \quad (4.14)$$

修正子段階：

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i,j}^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (E_{i+1,j}^p - E_{i,j}^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta y} (F_{i,j+1}^p - F_{i,j}^p) + \frac{\Delta t}{2} C_{i,j}^p + TVD_i + TVD_j \quad (4.15)$$

ここに、添字 n は計算の時間ステップ、 p は予測子段階（Predictor Step）、 i, j は x, y 方向のメッシュを番号、 $\Delta x, \Delta y$ は x, y 方向のメッシュを間隔、 Δt は計算のタイムステップ間隔を表している。 TVD_i, TVD_j は、 x, y 方向のTVD項であり、以下の式で表される。

$$TVD_i = [G^+(r_i^+) + G^-(r_{i+1}^-)](U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n) - [G^+(r_{i-1}^+) + G^-(r_i^-)](U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n) \quad (4.16)$$

$$TVD_j = [G^+(s_j^+) + G^-(s_{j+1}^-)](U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n) - [G^+(s_{j-1}^+) + G^-(s_j^-)](U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n) \quad (4.17)$$

$$r_i^+ = \frac{U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}, \quad r_i^- = \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}, \quad s_j^+ = \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}, \quad s_j^- = \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n} \quad (4.18)$$

$$G^\pm(r_i^\pm) = \frac{1}{2} C(v_t) \{1 - \Phi(r_i^\pm)\}, \quad G^\pm(s_j^\pm) = \frac{1}{2} C(v_f) \{1 - \Phi(s_j^\pm)\} \quad (4.19)$$

$$\Phi(r_i^\pm) = \max(0, \min(2r_i^\pm, 1)), \quad \Phi(s_j^\pm) = \max(0, \min(2s_j^\pm, 1)) \quad (4.20)$$

$$C(v_t) = \begin{cases} v_t(1-v_t) & ; v_t \leq 0.5 \\ 0.25 & ; v_t > 0.5 \end{cases}, \quad C(v_f) = \begin{cases} v_f(1-v_f) & ; v_f \leq 0.5 \\ 0.25 & ; v_f > 0.5 \end{cases} \quad (4.21)$$

$$v_t = \frac{\Delta t |u + \sqrt{gh}|_{\max}}{\Delta x}, \quad v_f = \frac{\Delta t |v + \sqrt{gh}|_{\max}}{\Delta y} \quad (4.22)$$

流れの計算の境界条件は、上流端、側壁、および式（4.19）に示した係数に関して、それぞれ以下のように設定した。まず、上流端の境界条件は、河床位を横断方向に一樣な断面で固定して線流量を一樣分布で与えるものとした。側壁の境界条件にはslip条件を適用した。TVD項に関しては、側壁との境界点および境界の一つ手前の値を必要とする場合、人工粘性係数 G を0として与えるものとした。

(2) 河床近傍流速の評価式

河床周辺の流速 u_b と v_b は、水路湾曲部のような2次流の卓越する場では水深平均流速の方向と一致しない。このため、本計算では河床近傍流速の算定に式（4.23）～式（4.26）に示す清水・西本^{20), 21)}

による流線の曲率半径の評価法を用いた。

$$u_{bs} = 8.5u_* \quad (4.23)$$

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (4.24)$$

$$u_b = u_{bs} \cos \alpha_s - v_{bs} \sin \alpha_s \quad (4.25)$$

$$v_b = u_{bs} \sin \alpha_s + v_{bs} \cos \alpha_s \quad (4.26)$$

ここに、 α_s ($= \arctan(v/u)$) であり、水深平均流速ベクトルの x 軸からの偏向角を表す。 N_* は7.0とする。 r は流線の曲率であり、式 (4.27) で表される^{20), 21)}。

$$r = -\frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (4.27)$$

式 (4.27) の計算には、 $u(\partial v/\partial x)$ および $v(\partial u/\partial y)$ を風上差分、 $v(\partial u/\partial x)$ および $u(\partial v/\partial y)$ を中央差分で差分化した²²⁾

(3) 掃流砂量式

本計算では、移動床と固定床が混在する場を対象とするために掃流砂層モデル^{9), 18)}を用いたうえで、固定床上の土砂が消失した地点にのみ芦田・道上⁶⁾による堆積限界掃流砂を求める掃流砂量式を導入した。これより、固定床の堆積限界掃流砂量が移動床の平衡掃流砂量より大きくなる場合があることを考慮した。

(a) 移動床で用いる掃流砂量式 (掃流砂層モデル^{9), 18)})

移動床の掃流砂量の算定には、芦田・道上式⁶⁾に河床の局所勾配が掃流砂量に及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉⁷⁾の式 (4.28) を用いた。

$$\frac{q_{bs}}{\sqrt{s}gd^3} = 17\tau_{*e}^{3/2} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{K_c} \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (4.28)$$

ここに、 q_{bs} [m^2/s] は移動床上の単位幅あたりの平衡掃流砂量、 s は砂粒の水中比重 ($= \rho_s/(\rho - 1)$)、 ρ_s は砂粒子の密度 (≈ 2.65)、 d は河床材料の平均粒径である。 τ_* ($= u_*^2/sgd$)、 τ_{*c} ($= u_{*c}^2/sgd$)、 τ_{*e} ($= u_{*e}^2/sgd$) は、それぞれ粒径 d に対する無次元掃流力、無次元限界掃流力、無次元有効掃流力である。 u_{*c} は、粒径 d に対する限界摩擦速度であり、式 (4.29) に示す岩垣式²³⁾より求める。

$$\begin{aligned} d &\geq 0.303 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 &= 80.9d \\ 0.118 \leq d &\leq 0.303 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 &= 134.6d^{31/32} \\ 0.0565 \leq d &\leq 0.118 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 &= 55.0d \\ 0.0065 \leq d &\leq 0.0565 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 &= 8.41d^{11/32} \\ d &\leq 0.0065 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 &= 226d \end{aligned} \quad (4.29)$$

u_{*e} は、粒径 d に対する有効摩擦速度であり式 (4.30) に示す対数型抵抗則⁶⁾より求める。

$$\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{u_{*e}} = 6.0 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{d(1 + 2\tau_*)} \right) \quad (4.30)$$

K_c は、河床の局所勾配と流向の影響を考慮する係数であり、芦田・江頭・劉⁷⁾より式 (4.31) で表される。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left(\left(1 + \frac{1}{s} \right) \cos \alpha \frac{\partial z_b}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (4.31)$$

ここに、 α ($= \arctan(v_b/u_b)$) であり、河床近傍流速の x 軸からの流向角を表す。 μ_s ($\cong 0.795$) は移動床領域における砂礫の静止摩擦係数である。 $\partial z_b/\partial x$, $\partial z_b/\partial y$ は局所河床勾配である。なお、 K_c の値は芦田・江頭・劉⁷⁾を参考に最小値を 0.5 に固定した。

移動床 ($r_b = 1$) の判定には、以下の r_b を用いた。 r_b は、掃流砂層モデルの掃流砂層厚さに関する関数^{9), 18)}で、式 (4.32) で表される。

$$\begin{aligned} r_b &= 1 & ; E_{bd} &\geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \\ r_b &= \frac{E_s}{E_{se}} & ; E_{bd} &< E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \end{aligned} \quad (4.32)$$

ここに、 \bar{c}_s ($\cong 0.26$) は鉛直平均の掃流砂の濃度の近似値であり²⁴⁾、 λ ($\cong 0.4$) は河床材料の空隙率である。 E_{se} は、平衡掃流砂層厚さであり Egashira and Ashida²⁴⁾より式 (4.33) で表される。

$$\frac{E_{se}}{d} = \frac{1}{c_s \cos \theta (\tan \phi_s - \tan \theta)} \tau_* \quad (4.33)$$

$$\theta = \arctan \left(-\frac{\partial z_b}{\partial x} \cos \alpha - \frac{\partial z_b}{\partial y} \sin \alpha \right) \quad (4.34)$$

ここに、 ϕ_s は砂礫の摩擦角であり、移動床領域の場合は $\tan \phi_s = 0.795$ を与えている。また、 θ は河床近傍流速の流向方向の局所河床勾配であり、河床近傍流速の流向と水平面のなす角で近似される。

E_s は、掃流砂層モデルの掃流砂層厚さであり^{9), 18)}、式 (4.35) で表される。

$$\begin{aligned} E_s &= E_{se} & ; E_{bd} &\geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \\ E_s &= E_{bd} \frac{(1 - \lambda)}{\bar{c}_s} & ; E_{bd} &< E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \end{aligned} \quad (4.35)$$

ここに、 E_{bd} は固定床面より上にある土砂の堆積厚さと掃流砂層厚さの合計値である。なお、掃流砂層厚さ E_s は最小厚さを給砂材料の 1/10 倍と仮定し、これより薄くならないものとした。

(b) 固定床の堆積限界掃流砂量を求める掃流砂量式の導入（掃流砂層モデル^{9), 18)}

固定床上から土砂が失われた場では、固定床上に土砂が堆積し始める際の堆積限界掃流砂量が同一水理条件下の移動床の平衡掃流砂量よりも大きくなる場合がある⁹⁾。そこで本計算では、固定床の露出した計算地点が単位時間あたりに流し得る最大の掃流砂量を堆積限界掃流砂量と仮定し、これを満足するだけの土砂量が掃流砂層 E_s の中に存在しない場合、以下のように固定床上の掃流砂量を土砂濃度の関数 r_b で修正した。

まず、固定床滑面領域における掃流砂量の算定には、芦田・道上⁹⁾によって導かれた堆積限界掃流砂量を求める式(4.36)を用いた。この式は、式(4.28)に示す芦田・道上⁹⁾の移動床の平衡掃流砂量式と同様の考え方から導かれたものであるが、固定床滑面領域には土砂の堆積層が存在しないため、河床近傍流速が砂粒レイノルズ数 Re_* ($= u_* d / \nu$) の関数になることが考慮されている。また、固定床滑面領域には河床波が存在しないと仮定し、有効摩擦速度 u_{*e} は $u_{*e} = u_*$ として扱われている。

$$\frac{q_{bt}}{u_* d} = \frac{\beta'}{\mu'_f} f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \tau_* \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{K_c} \frac{u_{*c}}{u_*}\right) r_b \quad (4.36)$$

ここに、 q_{bt} [m^2/s] は固定床上の単位幅あたりの堆積限界掃流砂量、 μ'_f (≈ 0.40) である。

式(4.36)の限界摩擦速度 u_{*c} および無次元限界掃流力 τ_{*c} は、芦田・道上⁹⁾により固定床滑面領域に適するように修正された以下の岩垣式を用いて評価する。

$$\begin{aligned} 0.1063 \leq d \leq 8.260 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 8.89 d^{2/3} \\ 0.0100 \leq d \leq 0.1063 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 4.17 d^{1/3} \\ d \leq 0.0100 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 90 d \end{aligned} \quad (4.37)$$

式(4.36) $f(u_* d / \nu)$ は高さ $z = d$ における u/u_* の値であり、式(4.38)にて評価される。

$$\begin{aligned} \frac{u}{u_*} &= \frac{u_* z}{\nu} & ; f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) < 6.83 \\ \frac{u}{u_*} &= \frac{1}{0.4} \xi \left(1/2 - \sqrt{\xi^2 + 1/4}\right) + 2.5 \ln \left(2\xi + \sqrt{4\xi^2 + 1}\right) + 6.83 & ; f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \geq 6.83 \end{aligned} \quad (4.38)$$

ここに、 $\xi = 0.4(u_* z / \nu - 6.83)$ である。

式(4.36)の r_b は、交換層厚に関する関数で、移動床領域の場合と同様に式(4.32)にて表される。また、固定床滑面領域における平衡掃流砂層さ E_{se} は以下の式(4.39)で求める。

$$\frac{E_{se}}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta (\tan \phi_{sb} - \tan \theta)} \tau_* \quad (4.39)$$

ここに、 ϕ_{sb} は砂礫と固定床の摩擦角であり、本計算では固定床領域の場合は $\tan \phi_{sb} = 0.45$ を与えている。

(c) 固定床と接する移動床地点における限界摩擦速度の修正

本計算では上述の (b) に述べた変更の他、両隣あるいは一つ上流側の計算メッシュに固定床が存在する移動床地点では、土屋²⁵⁾によって修正された以下の岩垣式（固定床領域の下流側に位置する移動床領域における限界摩擦速 u_{*c} ）を用いるものとした。

$$\begin{aligned} 0.0788 \leq d \leq 6.10 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 20.3d^{2/3} \\ 0.00763 \leq d \leq 0.0788 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 8.73d^{1/3} \\ d \leq 0.00763 \text{ cm} & ; u_{*c}^2 = 225d \end{aligned} \quad (4.40)$$

(d) 縦断・横断方向の掃流砂量

縦断・横断方向の掃流砂量の算定には、以下に示す河床近傍流速の流向と河床の局所勾配を考慮した芦田・江頭・劉⁽⁷⁾の方法を用いた。

$$q_{bx} = q_b \cos \beta_k \quad (4.41)$$

$$q_{by} = q_b \sin \beta_k \quad (4.42)$$

ここに、 q_{bx} 、 q_{by} は、 x 、 y 軸方向への単位時間あたりの掃流砂量である。 β_k は掃流砂 q_b の輸送方向と x 軸とのなす角であり、以下の式で表される。

$$\tan \beta_k = \frac{\sin \alpha - \Pi \Theta_y \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \tan \theta_y}{\cos \alpha - \Pi \Theta_x \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \tan \theta_x} \quad (4.43)$$

$$\Pi = K_t + \frac{1}{\mu_s} \quad (4.44)$$

$$\Theta_y = \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y} \quad (4.45)$$

$$\Theta_x = \Theta_y + \frac{\cos^2 \theta_x}{s} \quad (4.46)$$

ここに、 θ_x と θ_y はそれぞれ河床の x 、 y 方向の局所勾配である。 K_t （ ≈ 0.85 ）は砂礫に働く抗力と浮力との比例係数である。

(4) 河床位方程式

河床位方程式は、固定床領域を流れる流砂を扱うため、竹林ら^{(9),(15)}による以下の掃流砂層モデルを用いた。

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + (1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \Sigma \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad E_{bd} \geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \quad (4.47)$$

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + \Sigma \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0$$

$$E_{bd} < E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1-\lambda)} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = 0$$

河床位方程式の差分は、空間微分を風上差分、時間微分を前進差分で行うものとした。また、局所河床勾配が安息角以上になった場合は、勾配の高い計算メッシュから砂を低いメッシュに落とす補正を行い、局所勾配が安息角以上にならないようにした。

(5) 解析条件

数値解析に用いる水理条件は、上述の水路実験と同様とした。また、数値解析に用いる水路形状も上述の水路実験と同様とし、全長7.2m、水路幅0.2m、水路勾配1/150の長方形矩形水路とした。数値解析の計算格子は、水路縦断方向 Δx を1cm、水路横断方向 Δy を1cmとし、解析の時間間隔 Δt を0.004秒とした。

数値解析の解析ケースを表4.3.3に示す。解析ケースは、上述の水路実験と同じCase 1～Case 4、およびCase 6、Case 10を実施するものとした。Case 10はCase 3とほぼ同じ条件であるが、水路下流端の砂止め堰を外したものである。その他、これらに加え、表4.3.3に示すCase S-1を追加した。Case S-1は、Case 6と同じく固定床領域の露出した場に堆積限界掃流砂より多い給砂を与えるものであるが、固定床の露出領域の縦断距離を約3倍まで延長したものである。

4.3.5. 数値解析による水路実験の再現性検証と流砂・河床変動特性の考察

(1) 土砂供給量の減少に伴う固定床の露出 (Case 1～Case 2)

図 4.3.12 に Case 1 の水路実験および計算終了時の河床の様子を示す。図 4.3.12 によると、初期河床の平衡掃流砂量を給砂した Case 1 の数値解析では、水路実験と同様に、波長 1m 程度の交互砂州が形成されており、ある程度十分な再現性があるものと判断できる。

表 4.3.3 解析ケース

解析 ケース	計算開始時 の河床	計算開始時 の河床勾配	給砂量 q_b / Case 1 の平衡掃流砂量 q_{bs}	砂止め堰 の高さ(mm)	固定床領域 の長さ(m)
Case 1	移動床	1/150	1.0	3	3.7
Case 2			0.5		
Case 3	固定床	1/150	1.0	3	3.7
Case 4			1.5		
Case 6			2.5		
Case 10			1.0	0	3.7
Case S-1	固定床	1/150	2.5	3	11.0

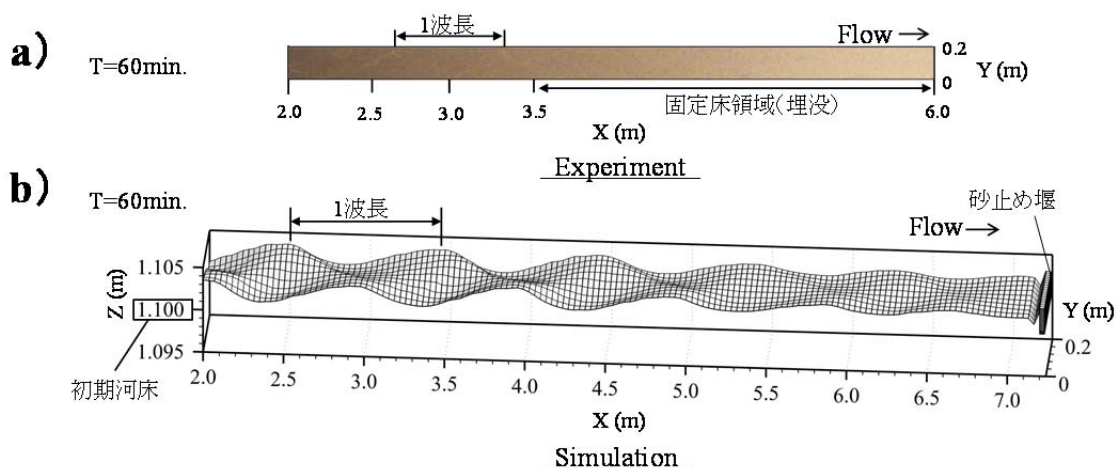


図 4.3.12 Case 1 の水路実験と計算終了時の河床, a) 水路実験, b) 数値計算

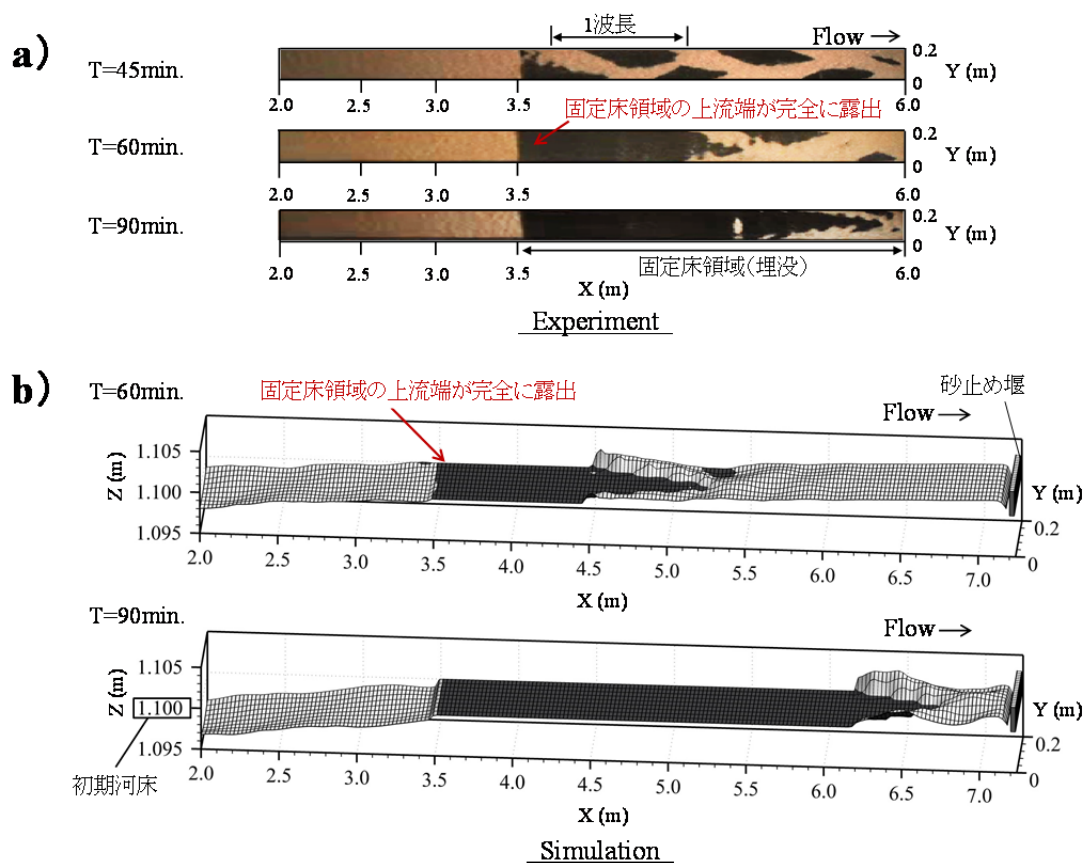


図 4.3.13 Case 2 の時間経過に伴う河床変動の様子(黒色部: 固定床の露出領域を示す), a) 水路実験, b) 数値計算

図 4.3.13 に Case 1 の平衡掃流砂量の 0.5 倍の給砂を与えた Case 2 の水路実験および数値解析による時間経過に伴う河床変動の様子を示す。図 4.3.13 a) によると, Case 2 の水路実験では, 始めに固定床

領域に砂州のトラフから下流側にかけて固定床の露出する交互砂州が形成され、次いで固定床領域の上流端が完全に露出した後、水路下流側に向かって交互砂州が消失している。

一方、図 4.3.13 a) に示す水路実験と図 4.3.13 b) に示す Case2 の数値解析を比較すると、本検討で用いた数値解析は水路実験と同様に、埋没していた固定床領域の上流端が露出した後、そこから下流側に向かって固定床上の土砂の堆積層が失われる特徴を表現できている。ただし、数値解析では、水路実験で認められた固定床の露出する交互砂州（図 4.3.13 a)）は殆ど形成されなかった。これは、河床に与える初期擾乱の空間分布特性と大きさが水路実験とは異なっているためと考えられる

(2) 移動床と固定床の混在する場における動的平衡河床の不可逆性と流砂・河床変動特性

(a) Case 1 の平衡掃流砂量と同量の土砂を給砂した場合（Case 3 および Case10）

Case 3 および Case 10 は、実験水路の固定床領域が完全に露出した状態で、水路上流域から Case 1 の平衡掃流砂量と同量の給砂を与えるものである。ここでは、Case 3 について検討する前に、水路下流端に砂止め堰を設置しない Case 10 の結果から検討する。

図 4.3.14 に、Case 10 の水路実験の実験終了時、および数値計算の計算終了時の河床の様子を示す。図 4.3.14 a) および図 4.3.14 b) によると、Case 10 の数値解析では、水路実験と同様に給砂開始から 120 分程度経過しても河床上に土砂が殆ど堆積せず、移動床のみの場と固定床を有する場との間に存在する「動的平衡河床の不可逆性」を明瞭に表現できている。

一方、図 4.3.15 に、水路下流端に砂止め堰の存在する Case 3 の水路実験、および数値計算の時間経過に伴う河床変動の様子を示す。図 4.3.15 a) および図 4.3.15 b) によると、Case 3 の数値解析では、水路実験と同様に計算開始から 30 分程度経過すると固定床領域の水路下流側に土砂が堆積する状況が表現されている。また、Case 3 の数値解析では水路実験と同様に、計算開始から 120 分程度経過しても固定床領域の全面に土砂が堆積せず移動床のみの場に戻らない「動的平衡河床の不可逆性」が表現されている。ただし、固定床上の土砂の被覆率について数値計算と水路実験の結果を比較すると、数値計算では固定床上に土砂の堆積域があまり形成されていないことが分かる。

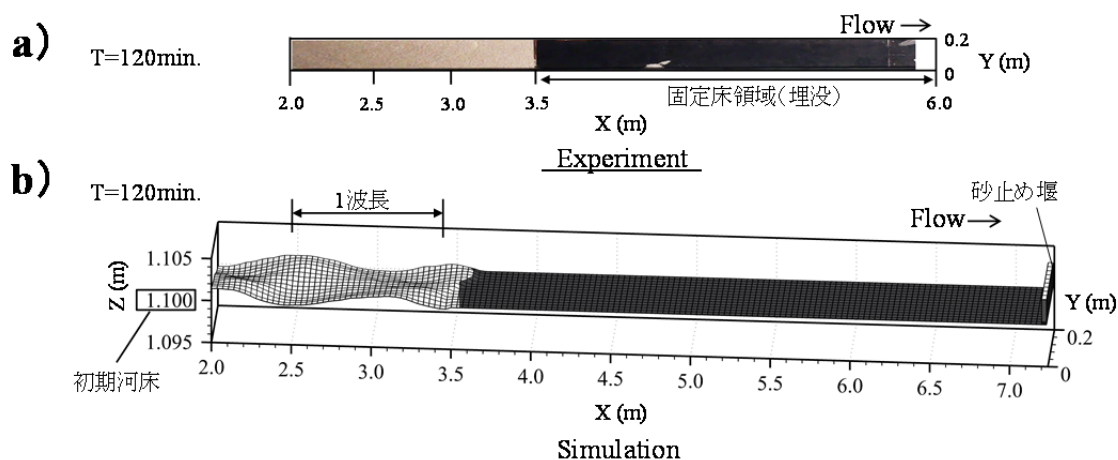


図 4.3.14 Case 10 の水路実験と計算終了時の河床, a) 水路実験, b) 数値計算

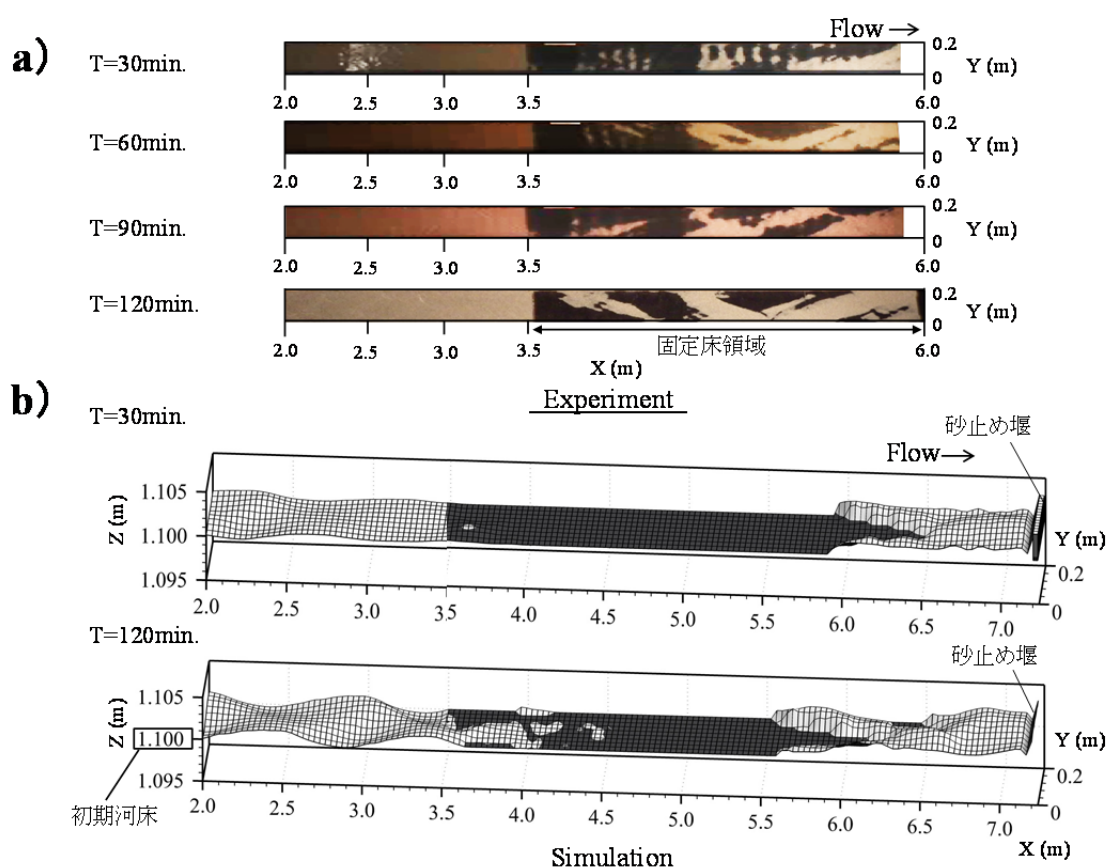


図 4.3.15 Case 3 の時間経過に伴う河床変動の様子(黒色部:固定床の露出領域を示す),
a)水路実験, b)数値計算

(b) 初期河床の平衡掃流砂量よりも多い土砂を給砂した場合 (Case 4, Case6)

ここでは, Case 1 の平衡掃流砂量の 1.5 倍の給砂を与えた Case 4, および固定床の堆積限界掃流砂量以上の給砂を与えた Case 6 (Case 1 の 2.5 倍) について, 数値解析による水路実験の再現性を検証する。なお, Case 4 と Case 6 は, いずれも水路下流端に砂止め堰を設置した実験ケースである。

図 4.3.16 に, Case 4 の水路実験および数値解析の時間経過に伴う河床変動の様子を示す。図 4.3.16 a) によると, Case 4 の水路実験では実験開始から 90 分, 120 分経過後の固定床領域において, 砂州のトラフから下流側にかけて固定床の露出する交互砂州が形成されている。この交互砂州は, 給砂量の増加に伴い水路上流側の移動床領域が河床上昇し, その河床上昇した砂州が固定床領域へと移動してくることで形成されたものである。一方, 図 4.3.16 b) に示す Case 4 の数値解析についてみると, 水路実験に比べて固定床上に土砂が堆積する時間が幾分遅いものの, 計算開始から 120 分経過後に固定床領域全面に交互砂州が形成される状況がある程度表現できている。

次に, 図 4.3.17 に, 固定床の堆積限界掃流砂量よりも多い土砂を給砂した Case 6 の水路実験および数値解析の時間経過に伴う河床変動の様子を示す。図 4.3.17 a) によると, Case 6 の水路実験では, 上述した Case 4 と同じく始めに固定床領域全面に交互砂州が形成され, 次いで, Case 4 と異なり比較的短時間で固定床領域の上流側から固定床の露出しない交互砂州が形成されている。これは, Case 6 で

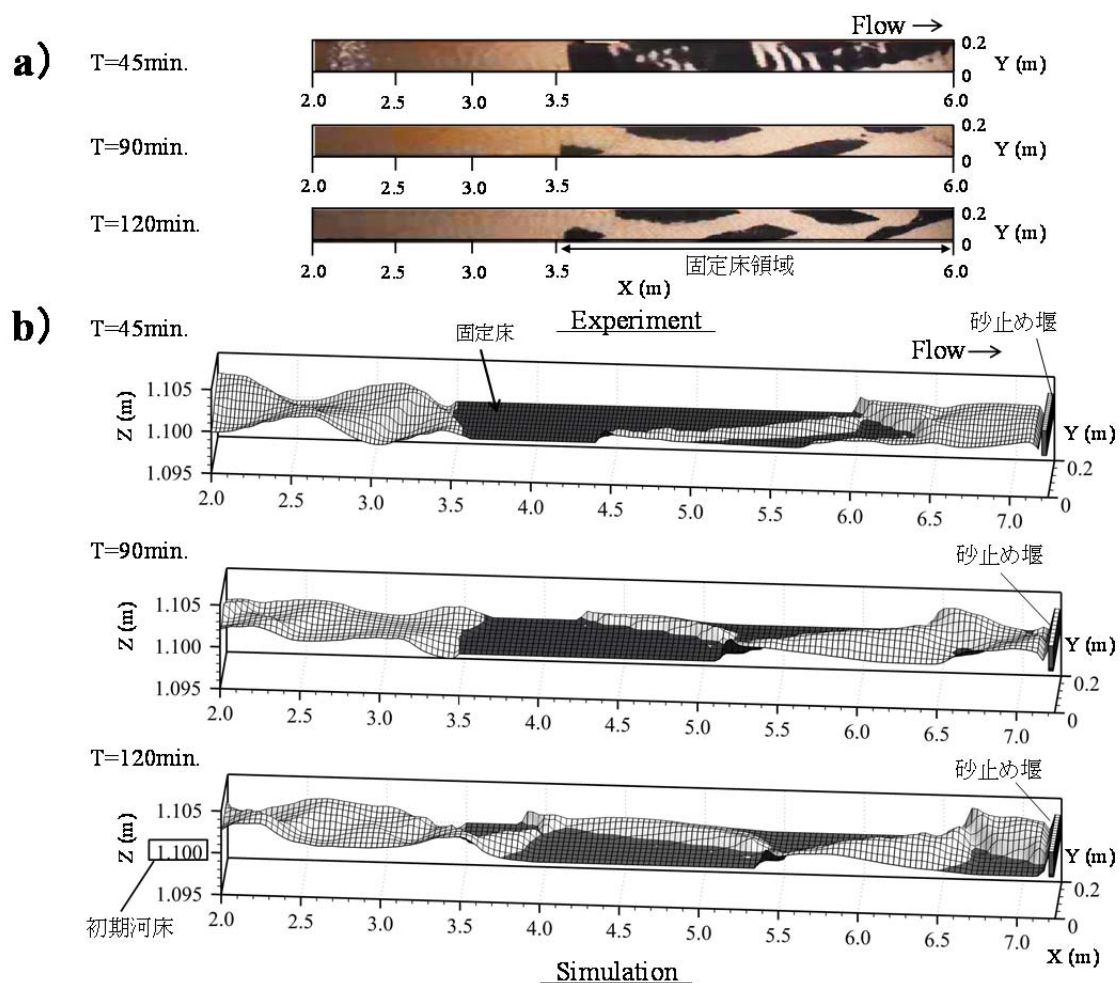


図 4.3.16 Case 4 の時間経過に伴う河床変動の様子(黒色部:固定床の露出領域を示す),

a)水路実験, b)数値計算

は固定床上に土砂の堆積が全く存在しない場合の堆積限界掃流砂量以上の土砂を供給しているため、給砂量が非常に大きく、図 4.3.17 b)の数値計算結果が示すように、水路上流側の移動床領域がその他のケースに比べて短時間で河床上昇するためと推察される。このような場では、移動床領域が急激に河床上昇することで水路下流側の固定床領域に流れ込む土砂量が増えるため、固定床上流側から順に河床が埋戻されることになるかと推察される。

このように Case 1~Case 4, および Case 6 の数値解析結果から、本検討で用いた数値解析モデルは、固定床を有する場における動的平衡河床の不可逆性の存在、および給砂量の違いに応じた固定床上の河床変動特性をある程度再現可能だと考えられる。

(c) 固定床領域の縦断距離が長い場合 (CaseS-1)

ここでは Case 6 と同じ水理条件と給砂条件のもと、固定床領域の縦断距離を 3 倍に延長させた Case S-1 について検討する。なお、Case S-1 の数値計算では、Case 6 の水路実験と同様に水路下流端に砂

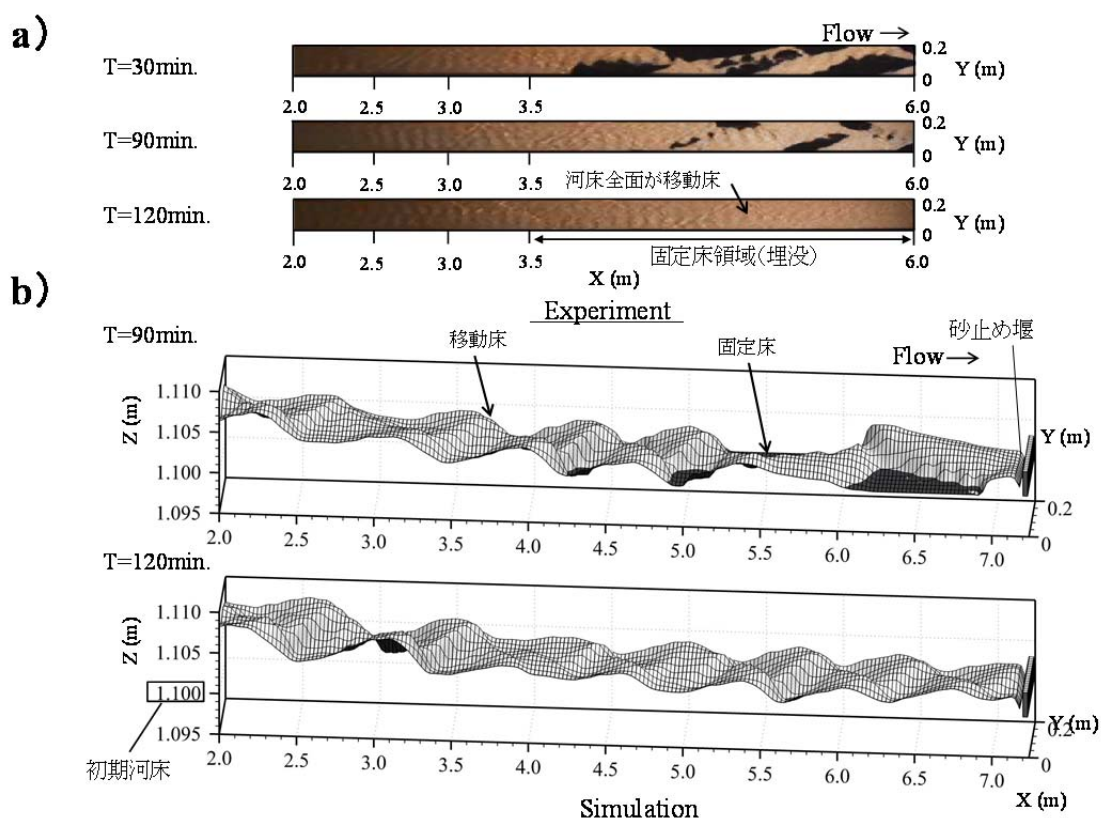


図 4.3.17 Case 6 の時間経過に伴う河床変動の様子(黒色部:固定床の露出領域を示す),
a)水路実験, b)数値計算

止め堰を設置している。

図 4.3.18 に、Case S-1 の計算開始から 108000 分後 (30 時間後) の河床位のコンター図、および各計算地点の掃流砂量比 (流し得る最大の掃流砂量/給砂量) のコンター図を示す。図 4.3.18 によると、Case S-1 では上述した Case 6 (図 4.3.17) と異なり、計算開始から 30 時間以上経過しても固定床領域全面に土砂が堆積せず、移動床のみの場に戻らないことが分かる。これは、移動床であれば、対象地点の移動床の平衡掃流砂量よりも多くの土砂が上流から対象地点に流れ込めば河床が上昇するが、固定床の場合、対象地点の固定床の堆積限界掃流砂量 (ここでは移動床の平衡掃流砂量の約 2 倍) よりも多くの土砂が上流から対象地点に流れ込まなければ移動床とならないためである。そのため、固定床領域を移動床に戻すには、固定床直上流の移動床地点において、固定床の堆積限界掃流砂量以上の掃流砂量となるまで河床勾配が急となる必要がある。以上の結果より、露岩域のような固定床河床に土砂を再被覆させる場合、上流からの給砂量を増加させることによって河床の土砂量を増やす (河床位を上昇させる) 方法は、移動床で同程度に河床位を上昇させることに比べて非常に多くの時間を要することに注意が必要である。

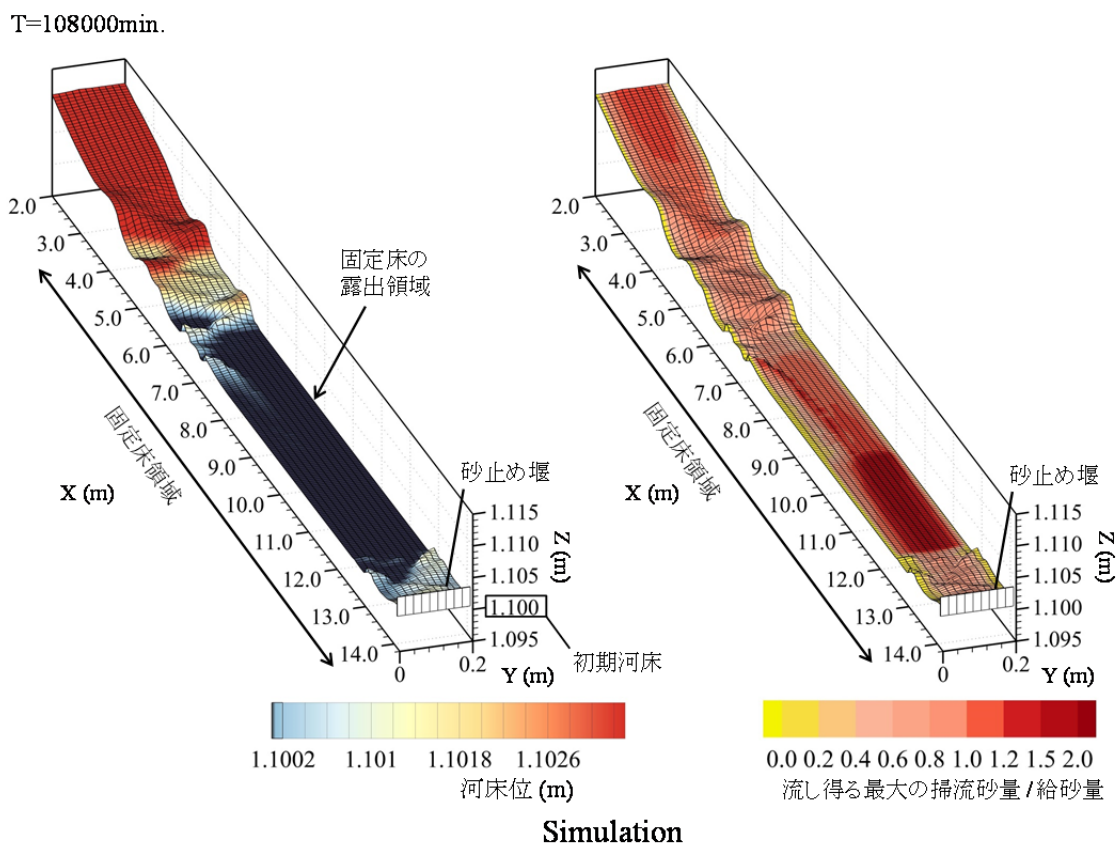


図 4.3.18 Case S-1 の 30 時間経過後の計算結果, 左図) 河床位コンター図, 右図) 各計算点における掃流砂量比 (流し得る最大の掃流砂量/給砂量) のコンター図

4.3.6. 結 語

本研究では, 移動床のみの場と移動床と固定床の混在する場における動的平衡河床の不可逆性と, 固定床を有する場に与える給砂量を順に変化させることによる流砂・河床変動特性の変化を水路実験と数値解析から検討した。これより, 次の結論を得た。

- (1) 水路実験では, 同一の水理条件のもとで固定床の有無と給砂条件のみを変化させ, 移動床のみの場と移動床と固定床の混在する場の間には「動的平衡河床の不可逆性」が存在することを確認した。この動的平衡河床の不可逆性とは, 河床低下に伴いに固定床が一度広域的に露出した場では, その後, もとの初期河床の平衡掃流砂量程度の土砂を与えても移動床河床に戻らないこと, および上流からの給砂量を増やして固定床領域全面が移動床のみの場に戻った後は急激に河床上昇が生じ, その後給砂量を減らしても固定床領域の露出する場に戻らないことを示すものである。
- (2) 本研究では, 固定床を流れる砂礫の流砂特性を平面 2 次元河床変動計算の枠組みの中で扱う方法として, 竹林らの掃流砂層モデルを用いたうえで, 固定床上に土砂の堆積層が存在しない地点にのみ芦田・道上による堆積限界掃流砂量を考慮した掃流砂量式を導入した。これよ

り、本検討で用いた数値解析は、移動床と固定床の混在する場の動的平衡河床の不可逆性、および固定床領域全面が移動床河床に戻るまでのプロセスを表現することができた。

- (3) 水路上流から、固定床上に土砂の堆積が存在しない場合の堆積限界掃流砂量より多い土砂を与えた場合、水路上流側の移動床領域が急激に河床上昇することで水路下流側の固定床領域に流れ込む土砂量が増えるため、固定床上流側から順に河床が埋戻されることになると推察される。ただし、固定床の露出領域が水路縦断方向にかなり長距離に及ぶ場合、水路上流から堆積限界掃流砂量よりも多い土砂を供給したとしても簡単には移動床のみの場に戻れない状況が生じる。

4.4. 結 論

本章では、移動床と固定床が混在する場を対象に、1) 水路実験による移動床と固定床における流砂の伝播速度の違い、2) 水路実験による移動床と固定床の混在する場の動的平衡河床の不可逆性の確認、および数値解析による現象の再現と、固定床領域全面が移動床河床に戻る際の流砂・河床変動特性を検討した。これより次の結論を得た。

- (4) 移動床水路と固定床水路に同量・同質の給砂を与えた場合、固定床水路ほど流砂の伝播速度が速くなる。これは、移動床水路では流砂が河床材料と交換しながら輸送されるため、固定床水路に比べて流砂がゆっくりと水路下流へと伝播するためである。一方、移動床水路床となり、固定床水路では上流からの給砂量に応じて流砂の伝播速度が変化する。本実験では、固定床水路にて総給砂量を統一したうえで単位時間あたりに与える給砂量を変化させた場合、流砂の下流への伝播特性は固定床の堆積限界掃流砂量を境にして変化することが示された。
- (5) 移動床と固定床の混在する場の流砂・河床変動特性を水路実験および平面2次元河床変動解析から検討した結果、移動床のみの場と移動床と固定床の混在する場の間には動的平衡河床の不可逆性が存在することが確認された。また、本研究では、固定床を流れる砂礫の流砂特性を平面2次元河床変動計算の枠組みの中で扱う方法として、竹林らの掃流砂層モデルを用いたうえで、固定床上に十分な土砂が存在しない地点にのみ芦田・道上による堆積限界掃流砂量を考慮した掃流砂量式を導入した。これより、本検討で用いた数値解析は、移動床と固定床の混在する場の動的平衡河床の不可逆性のある程度表現することができた。

参考文献

- 1) 金澤康史・三宅洋: コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, 応用生態工学会誌, 9(2), pp.141-150, 2006.

- 2) 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進: 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響, 応用生態工学会誌, 4(2), pp.133-146, 2001.
- 3) 豊島照雄・中野繁・井上幹生・小野有五・倉茂好匡: コンクリート化された河川流路における生息場所の再造成に対する魚類個体群の反応, 日本生態学会誌, 46(1), pp.9-20, 1996.
- 4) Roni, P., Bennett, T., Morley, S., Pess, G. R., Hanson, K., Slyke, D. V. and Olmstead, P.: Rehabilitation of bedrocks stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota, *River Research and Applications*, 22(9), pp.967-980, 2006.
- 5) 石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・剣持浩高・高橋浩輝・丸岡 昇・岩瀬 晴夫: 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価, 応用生態工学会誌, 12(1), pp.57-66, 2009.
- 6) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 206, pp.59-69, 1972.
- 7) 芦田和男・江頭進治・劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 35, pp.383-390, 1991.
- 8) 岡部健士・穴瀬康雄・山下秀基: 滑面固定床上における堆積限界掃流輸送量, 水工学論文集, 38, pp.633-640, 1994.
- 9) 竹林洋史・江頭進治・金海生: 交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級, 水工学論文集, 41, pp. 895-900, 1997.
- 10) 早川博・宮本大・夏井皓盛: 屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.781-786, 2011.
- 11) Chatanantavet, P. and Parker, G.: Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, *Water Resources Research*, 44, WR12446, 2008.
- 12) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: A mechanics model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resources Research*, 40, W06301, 2004.
- 13) Finnegan, N. J., Sklar, L. S. and Fuller, T. K.: Interplay of sediment supply, river incision, and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel, *Journal of Geographical Research*, 112, F03S11, 2007.
- 14) 井上卓也・清水康行・山口里実・伊藤丹・Parker, G.: 給砂量と岩床侵食地形の関係, 水工学論文集, 58, 2014.
- 15) Takebayashi, H., Okabe, T. and Shinozaki Y.: Geometric Characteristics of Bars on Layers with Rocks or Cohesive Material, *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*, pp.267-277, 2007.
- 16) 旭一岳・清水康行: 河床に固定物があるときの河床変動の計算, 水工学論文集, 45, pp.763-768, 2001.
- 17) 黒木幹男・岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, 586, pp. 39-50, 1984.
- 18) Luu, L. X., Egashira, S. and Takebayashi, H.: Investigation of Tan Chau Reach in lower Mekong using

field data and numerical simulation, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 48, pp.1057-1061, 2004.

- 19) Causion, D. M.: High Resolution Finite Volume Schemes and Computational Aerodynamics, Nonlinear Hyperbolic Equation Theory, Computation Methods and Applications, 24, pp. 63-74, 1989.
- 20) 清水康行・西本直史: 2次流を考慮した2次元モデルによる河床変動計算, 開発土木研究所報告書, pp.63-90, 1992.
- 21) 清水康行・西本直史: 水制による河床変化の数値計算, 開発土木研究所報告, 98, pp. 87-111, 1993.
- 22) 西本直史・清水康行・青木敬三: 流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, 456, II -21, pp.11-20, 1992.
- 23) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 41, pp.1-21, 1956.
- 24) Egashira, S. and Ashida, K.: Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, (Edited by H. H. Shen et al.), Elsevier, pp.391-400, 1992.
- 25) 土屋義人: 滑面水路床の下流端における洗掘限界, 土木学会論文集, 80, pp.18-28, 1956.

第5章 固定床に設置した水制まわりの流れ，掃流砂，河床変動特性

5.1. 概 説

水制工はその周りに局所洗掘や土砂の堆積を促すため，単調化した河川環境を修復する手法の一つとして注目されている。しかし，第3章では，コンクリート三面張り河川に小規模な直角水制群を設置した結果，水制近傍には土砂の堆積域が小規模かつ不安定に形成されたのみで，底生動物の生息状況に期待したほどの改善効果は得られなかった。この理由は，池尻川の上流からの土砂供給量が少なかったことに加えて，池尻川に設置した水制群の配置が移動床河川に対する設計指針を参考に決定したこと等が要因として推察される。第4章で示したとおり，移動床と固定床とでは同一の水理条件のもとであっても流砂特性や河床変動特性が異なり，一度広域的に固定床が露出した場合，上流からの土砂供給量を元の移動床の平衡掃流砂量に戻したところで簡単には移動床河床へと戻らない動的平衡河床の不可逆性が存在する。このことから，露岩河川やコンクリート三面張り河川のように固定床が広く露出した流れ場の環境修復は，川幅の拡幅等により無次元限界掃流力を抑制できない限り，第3章にて検討したように水制群のような構造物を利用することで河岸沿いに流れの緩流域や土砂の堆積域を創出することが好ましい考えられる。しかし，第4章にて移動床水路と固定床水路で流砂・河床変動特性が異なったように，水制についても，移動床と固定床では水制近傍の流れ，流砂・河床変動特性が異なるものと予想される。

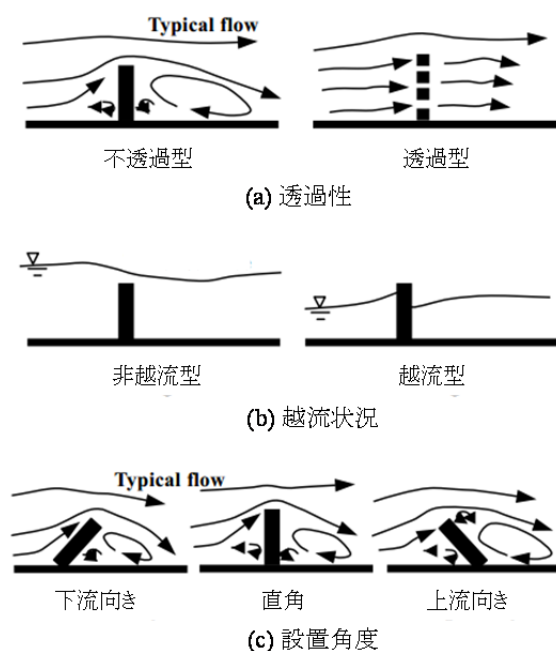


図 5.1.1 水制工の分類と流れ場構造の概要 (Zhang and Nakagawa¹⁾ を一部改変)

そこで本章では、移動床と固定床に設置された水制まわりの流砂の輸送・河床変動特性の違いを明らかにし、そのうえで固定床河川に適する水制配置の検討を行うこととする。本章の構成は以下のとおりである。まず、5.2 節では、不透過型の直角水制（図 5.1.1 参照）を対象とし、水路実験および平面 2 次元河床変動解析から固定床上の水制まわりの流れ、流砂、河床変動特性について明らかにする。この際、第 3 章にてコンクリート三面張り河川（池尻川）に設置した直角水制まわりに土砂の堆積域が殆ど形成されなかった原因についての考察も行う。次いで、5.3 節では、水制の設置角度を異ならせ、固定床河川の側壁沿いに土砂の堆積域を創出させ得る水制配置について検討を行う。

5.2. 直角水制工

5.2.1. はじめに

我が国の市街地や農村地域には、河床に十分な土砂の堆積域が存在しない固定床領域を有する中小河川が各地で認められる。自然状態の河川では、河床材料が浸食と堆積を繰り返しながら輸送され、河道内の微地形が変化する。それに伴い、自然河川の河道内物理環境は、常に時空間的に不均質な状態に保たれている。しかしながら、河床が洗掘されない固定床領域では、流れの集中する滞筋が形成されず、河道全面にわたって様な流れ場が生じやすい。このため、固定床河川では河道内物理環境が単調化しやすく、河床材料の消失や流れの速さといった特殊な環境に耐えうる限られた生物種のみが高密度で生息する貧弱な河川生態系が成立することが指摘されている^{2), 3), 4)}。

近年になり、こうした固定床河川にも多様な生物が生息できる良好な河川環境を確保する川づくりが求められ始めた。しかし、市街地や農村地域を流れる河川では、堤防上や堤防のすぐ近くまで土地利用されているため、堤外地を広く確保し、砂州の動態を利用した河道内物理環境の改善を行うことが難しい。さらに、現状では固定床河川の流砂、河床変動特性を考慮した環境修復技術も十分に確立されていない（2.2 節参照）。そのため、市街地や農村地域を流れる固定床河川において河道内物理環境の改善を行う場合、方法の一つとして側壁沿いにのみ土砂を堆積させ、できる限り河積を損なわずに河道内に水生動物群集の生息場所を創出することが考えられる。そこで、本検討では側壁沿いにのみ土砂を堆積させる手法として、水制工に注目することとした。

水制は、河岸から流心に向けて横断方向に突出した構造物である。水制は古くから航路確保や河岸浸食の抑制等を目的に設置され、近年では、移動床河川における河川生態系の修復技術の一つとしても注目されている。これは、河川改修によって単調化した河道内物理環境を改善する手法として、水制による局所洗掘や流れの偏向、あるいはその下流域に土砂の堆積地形を形成する特性が多様な流れ場を形成すると期待されるためである。事実、水制のこうした特性を期待した河川生態系の修復事例は世界的に実施されており、水制近傍にて魚類の種類数、個体数、幼魚数などが増加するといった成果が報告されている^{5), 6), 7)}など。このような水制がもつ多様な環境を創出する機能は移動床河川に関する報告であるが、もし固定床河川にこの機能を適応することが可能であれば、固定床化した河床上に

土砂を再び堆積させ、多様な水生動物の生息場所を再生させるきっかけになると考えられる。

しかしながら、水制を有する流れ場の既存報告は多数存在するものの、固定床上の水制近傍の流砂、河床変動特性に関する知見は非常に限られている。既存報告の大半は、水路実験にて水制周りの流れ場のみを扱ったもの^{8), 9), 10)}など、移動床上の水制周りの洗掘を扱ったもの^{11), 12), 13)}など、あるいは実河川の調査報告^{14), 15), 16)}などであり、固定床上に設置された水制近傍の流砂、河床変動特性を扱った報告は殆ど存在しない（ただし水制域や止水域での浮遊砂の堆積に関するものは幾らかある^{17), 18)}）。固定床河川では、移動床河川と異なり水制近傍の河床が洗掘されない。そのため、移動床河川と固定床河川では水制近傍の流れ構造が異なり、それに伴って水制近傍の流砂、河床変動特性も異なることが予想される。

そこで本節では、移動床と固定床に設置された直角水制まわりの流砂・河床変動特性の違いを水路実験と数値解析から検討する。まず、水路実験では移動床と固定床に直角水制を設置し、水制近傍の流砂の輸送経路および河床変動の違いについて確認する。続いて、数値解析では固定床に単一水制が設置された流れ場を想定し、定常給水と非定常給水条件下における水制近傍の流れ、流砂、河床変動特性をより詳細に把握する。これより、固定床領域に設置された直角水制まわりの流砂・河床変動特性を明らかにすると共に、固定床河川の側壁沿いに土砂を堆積させる方法として、直角水制の有効性を検証する。

5.2.2. 実験方法と解析方法

(1) 実験水路

実験水路の概要を図 5.2.1 に示す。水路は、全長 5.0m、水路幅 0.2m の長方形矩形水路とし、水路床勾配を 1/300 に設定した。水路床は固定床河床とし、ベニヤ板を水路床より 6.0cm 嵩上げた位置に張り付けた。移動床実験を行う際は、水路床のベニヤ板の一部をはずし（図 5.2.1 に示す移動床領域）、

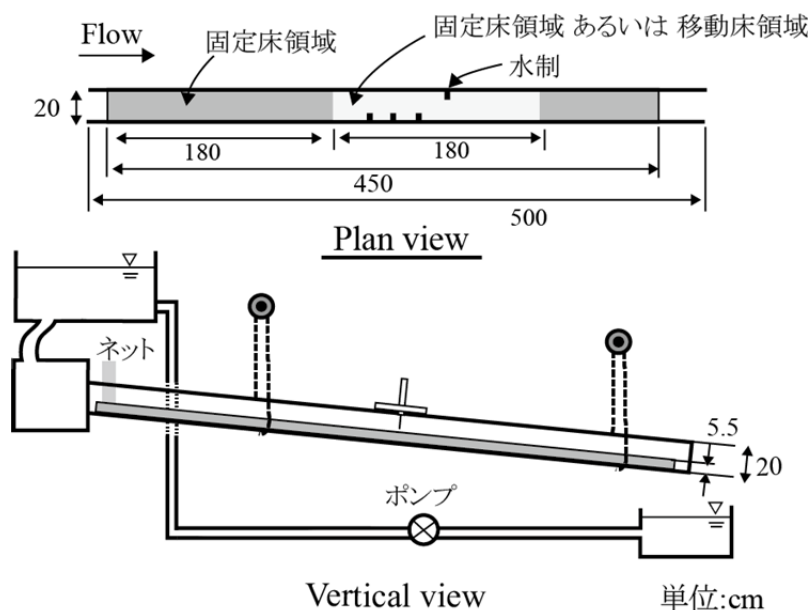


図 5.2.1 実験水路概要

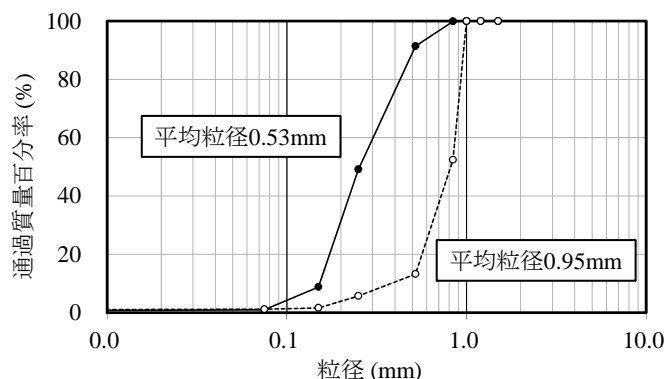


図 5.2.2 河床材料の粒径加積曲線(平均粒径 $d_m = 0.53\text{mm}$), および
給砂材料の粒径加積曲線(平均粒径 $d_m = 0.53\text{mm}$, $d_m = 0.95\text{mm}$)

そこに平均粒径 0.53mm の一様砂を 6.0cm の厚みで敷き詰め、固定床領域と滑らかに接続する移動床領域を作成した。

実験で用いる水制は、すべて不透過型の直角水制とした。水制サイズは、水路横断方向の水制長を 3.0cm、水路縦断方向の水制幅を 1.5cm とした。水制高は越流条件によって異ならせ、非越流実験の場合は初期河床から 10.0cm、越流実験では初期河床から 1.5cm 突出させた。水制の設置箇所は、第 1 水制が水路上流端より 2.2m 下流の水路右岸側に位置するものとした。複数の水制を設置する場合は、図 5.2.1 に示すとおり、第 2 水制、第 3 水制が水路右岸側、第 4 水制が水路左岸側に位置するものとした。この第 4 水制は、第 3 章にて検討した池尻川に設置した水制群と同じく、片側 3 基ずつの水制群が下流域へと続くことを想定して設置したものである。

(2) 実験条件

実験の水理条件を表 5.2.1、実験ケースを表 5.2.2 に示す。表 5.2.2 における実験ケース名は、M が移動床実験、F が固定床実験を示している。これらの実験では、全てのケースで横断方向の水制長さを 3.0cm に統一し、河床材料（移動床と固定床）、水制のアスペクト比、越流条件のみを変化させた。

表 5.2.2 に示す Case M-1 と Case M-2 は、移動床上に越流条件のみ異なる単一を設置したものである。Case M-3 と Case M-4 は、移動床上に越流条件のみ異なるアスペクト比 4.0 の水制群を設置したものである。さらに、Case M-5 と Case M-6 は、移動床に越流条件のみ異なるアスペクト比 8.0 の水制群を設置したものである。一方、固定床実験である Case F-1 と Case F-2 は、上述した移動床実験 Case M-1 と Case M-2 と同じ条件の単一水制を移動床ではなく固定床上に設置したものである。実験ケース名に付随する(a)と(b)の記号は、供給砂礫の平均粒径の違いを表している。記号(a)のケースは移動床実験にて用いた河床材料と同じ平均粒径の砂礫 ($d_m = 0.53\text{mm}$) を与え、固定床と移動床における水制近傍の土砂の捕捉特性を比較するものである。一方、記号(b)のケースはそれより幾分大きい平均粒径の砂礫 ($d_m = 0.95\text{mm}$) を与え、粒径による違いを確認するものである。最後に、Case F-3～Case F-5 は固定床上にアスペクト比 4.0 と 8.0 の越流型の水制群を設置し、水制配置による土砂の捕捉特性の違いを確認するものである。

表 5.2.1 水理条件

水理条件	
流量 Q (m ³ /s)	0.00125
水路幅 B (m)	0.2
水路床勾配 I_b	1/300
固定床面での等流水深 H_0 (cm)	2.0
移動床の河床材料の平均粒径 (mm)	0.53

表 5.2.2 実験ケース

[移動床実験]

実験 ケース	越流 条件	水制 間隔(m)	アスペクト 比率 D/L	河床材料の平均 粒径 d_m (mm)	給砂量 Q_b (m ³ /s)	時間 (min.)
M-1	非越流	単一水制	—	0.53	0	20
M-2	越流					
M-3	非越流	0.12	4.0	0.53	0	20
M-4	越流					
M-5	非越流	0.24	8.0	0.53	0	30
M-6	越流					

[固定床実験]

実験 ケース		越流 条件	水制 間隔(cm)	アスペクト 比率 D/L	給砂の平均 粒径 d_m (mm)	給砂量 Q_b (m ³ /s)	時間 (min.)
F-1	(a)	非越流	単一水制	—	0.53	0.673×10^{-6}	20
	(b)				0.93		
F-2	(a)	越流	単一水制	—	0.53	0.673×10^{-6}	20
	(b)				0.93		
F-3	(a)	越流	6.0	2.0	0.53	0.673×10^{-6}	20
	(b)				0.93		
F-4	(a)	越流	12.0	4.0	0.53	0.673×10^{-6}	20
	(b)				0.93		
F-5	(a)	越流	24.0	8.0	0.53	0.673×10^{-6}	30
	(b)				0.93		

水制群のアスペクト比は、次のように定めた。まず、実河川ではアスペクト比 3.0～4.0 程度が経験的によく採用されている¹⁹⁾。また、池田ら²⁰⁾によると、移動床領域ではアスペクト比 2.0 が主流域と水制域（水制群に囲まれた領域）との質量・運動量交換率が最も高くなることが報告されている。これより、本実験でのアスペクト比は、アスペクト比 4.0 を第 3 章にて検討した池尻川の既設水制に近い値として、アスペクト 2.0 を固定床にて水制域と主流域との質量・運動量交換率が高い値であることを期待して、アスペクト比 8.0 をこれまであまり採択されていない広い値を固定床領域に設置した場合の効果を検討することを目的として設定した。

実験中の給砂条件は次のとおりである。移動床実験では、水制近傍のみが主に洗掘される静的平衡状態に近い条件であったため、給砂を行なわなかった。一方、固定床実験では、初期河床上に土砂が存在しないため、水路上流端より 2.0m の地点からの給砂を行った。固定床実験で与えた給砂量は、移動床実験の平衡流砂量の値に揃えると非常にわずかな量となるため、ある程度十分な土砂供給量として芦田・道上式²¹⁾にて算出した平均粒径 0.53mm の砂礫の平衡流砂量の約 10 倍を与えることとした。本実験の水理条件下では、固定床上に供給した砂礫は移動床における移動限界掃流力付近の粒径であるが、固定床上の水制の無い領域において留まることなく輸送された。

(3) 測定項目

実験中の測定は、単一水制を設置した Case M-1, Case M-2, Case F-1, Case F-2 の 4 ケースのみ、水路右岸から 2.0cm 離れた場所の水位の縦断変化を計測した。ただし、移動床実験では水制近傍の洗掘孔が発達するにつれて水位変動が生じる。このため、水位測定は実験開始より 10 分程度経過し、局所洗掘が十分に進んでから行った。その他、固定床実験のみ、給砂地点から水よりも比重の軽い塩化ビニル粉末を流し、固定床上の水制域へと浮遊形態の粒子が流れ込むかについての確認も行った。

実験継続時間は、表 5.2.2 に示すとおり、移動床上に設置した水制近傍の洗掘孔がほぼ動的平衡状態に達するまでとした。実験終了後、全ての実験ケースで水制近傍の河床位を測定した。これより、河床材料、水制の越流条件およびアスペクト比の違いが水制近傍の河床変動に与える影響を確認した。

(4) 数値解析法

数値解析は、固定床に設置した単一水制まわりの流れ、流砂・河床変動特性を説明するために行った。解析プログラムは、4.3 節で述べた平面 2 次元河床変動計算とほぼ同様の支配方程式を用いた。固定床上の流砂量の評価と河床変動計算には、竹林ら^{22), 23)}の掃流砂層モデルを適用し、固定床に存在する土砂の存在率 R_b を芦田・江頭・劉²⁴⁾の流砂量式に乗じた式(5.1)を用いた。

$$\frac{q_{bs}}{\sqrt{sgd^3}} = 17\tau_{*e}^{3/2} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{K_c} \frac{u_{*c}}{u_*}\right) r_b \quad (5.1)$$

ここに、 q_{bs} [m²/s] は単位幅あたりの掃流砂量、 s は砂礫の水中比重、 g は重力加速度、 d は河床材料の平均粒径、 K_c は河床勾配および流向の影響を考慮する係数、 τ_{*e} は無次元有効掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 τ_* は無次元掃流力、 u_{*c} は無次元掃流力、 u_* は摩擦速度である。交換層厚さ r_b は、固定床上の土砂濃度に関する関数で、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} r_b &= 1 & ; E_{bd} \geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1-\lambda)} \\ r_b &= \frac{E_s}{E_{se}} & ; E_{bd} < E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1-\lambda)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

ここに、 \bar{c}_s (≈ 0.26) は鉛直平均の掃流砂の濃度の近似値であり²⁵⁾、 λ (≈ 0.4) は河床材料の空隙率、 E_s は掃流砂層厚さ、 E_{bd} は固定床面より上にある土砂の堆積厚さと掃流砂層厚さの合計値である。

E_{se} は、平衡掃流砂層厚さであり、Egashira and Ashida²⁵⁾ より式 (5.3) で表される。

$$\frac{E_{se}}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_* \quad (5.3)$$

ここに、 ϕ は砂礫と河床の摩擦角であり、 θ は流砂の輸送方向の局所河床勾配である。
固定床上の河床変動の計算には、以下に示す掃流砂層モデル^{23), 26)} を用いた。

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + (1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \Sigma \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad E_{bd} \geq E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \quad (5.4)$$

$$\bar{c}_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + \Sigma \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad E_{bd} < E_{se} \frac{\bar{c}_s}{(1 - \lambda)} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = 0$$

ここに、 z_b は河床位高、 q_{bx} と q_{by} は x , y 方向の流砂量である。

(5) 解析条件

数値解析の計算領域は、長さ 2.0m、幅 0.2m、勾配 1/300 の固定側岸を有した直線矩形水路とした。
初期河床形状は平坦床とし、上流から 1.0m の地点の右岸側に、横断方向の水制長さ 3.0cm の非越流水制を 1 基設置した。上流境界からの流砂量は、土砂が固定床上のどの領域を流れるかを明らかにす

表 5.2.3 解析条件

実験 ケース	流量 Q (m ³ /s)	供給砂の粒径 d_m (mm)
S-1	0.00125	0.53
S-2	0.0025	0.53
S-3	0~0.0025	0.53
S-4	0.00125	0.20

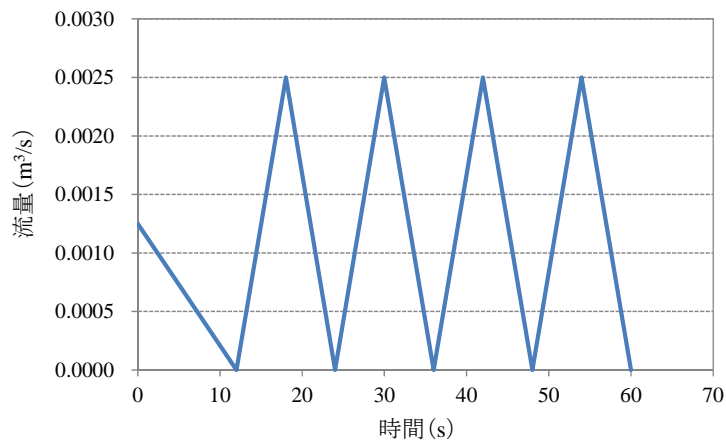


図 5.2.3 数値解析 CaseS-4 における流量(非定常)

るため、平衡掃流砂量の 1/3 倍と実験より少なめの土砂を与えるものとした。

表 5.2.3 に解析条件を示す。Case S-1 は、上述の水路実験における Case F-1 と同様の解析条件である。Case S-2 は、Case S-1 の 2 倍の流量を与えたものであり、流量の増加による水制周りの流砂特性の違いを検討するものである。Case S-3 は、図 5.2.3 に示すハイドログラフを与え、流れの非定常性が水制周りの流砂特性に与える影響を検討するものである。Case S-4 は河床材料の粒径が水制周りの流砂特性に与える影響を検討するため、Case S-1 よりも細かい粒径の土砂を給砂したものである。

5.2.3. 実験結果と考察

図 5.2.4 に、移動床実験 Case M-1～Case M-6 の実験終了後の河床変動量を示す。図 5.2.5 には、実験終了後の河床の写真、および水制近傍における実験中の流砂の移動方向（破線）を示す。図 5.2.4 によると、移動床実験ではいずれのケースも水制上流域に局所洗掘が、水制下流域に土砂の堆積域の形成が認められた。また、図 5.2.4 より Case M-1～Case M-6 の洗掘孔を比較すると、移動床実験では単一水制、水制群に関係なく、洗掘孔は越流水制よりも非越流水制の場合に大きく形成された。同様に、土砂の堆積厚についても、図 5.2.4 によると越流水制よりも非越流水制の場合に厚く形成されることが分かる。これは、図 5.2.5 に示す流砂の移動方向（破線）で表されるとおり、水制下流域に堆積する土砂は水制先端部に形成された洗掘孔内から浮遊形態で pickup された砂礫であるため、大規模な洗掘孔の生じる非越流水制ほど土砂が厚く堆積しやすいからである。

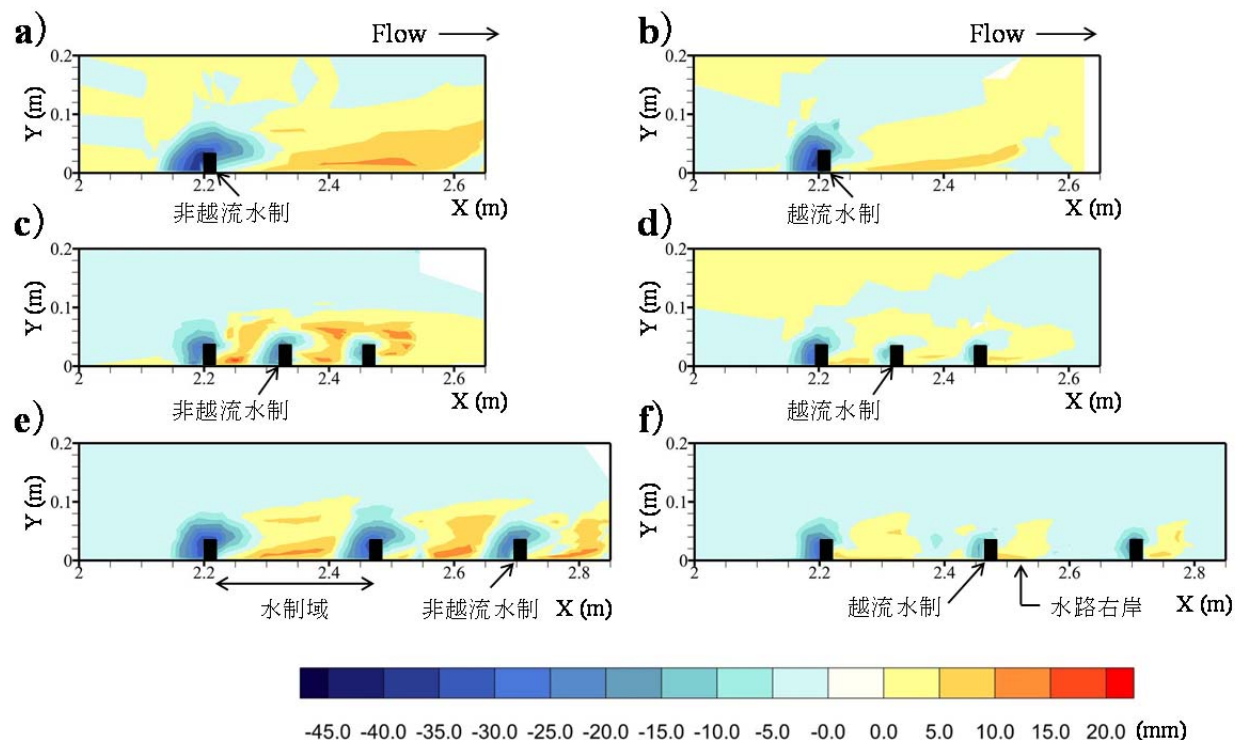


図 5.2.4 移動床実験における河床変動量, a) Case M-1, b) Case M-2, c) Case M-3, d) Case M-4, e) Case M-5, f) Case M-6

一方、固定床上に水制を設置した Case F-1～Case F-5 では、いずれのケースも流砂が水制域へと捕捉されなかった。これは、上流から輸送されてきたほぼ全ての掃流砂が、最上流に位置する第1水制の水制先端部に生じる水はね効果により、水制の対岸側へと運ばれたためである。ここで、固定床上に設置した水制まわりの流れと流砂の輸送状況を図 5.2.6（ここでは、確認しやすいように実験より多めの土砂を与えている）から説明すると、第1水制の水制先端部の流れにおいて強い水はね効果が生

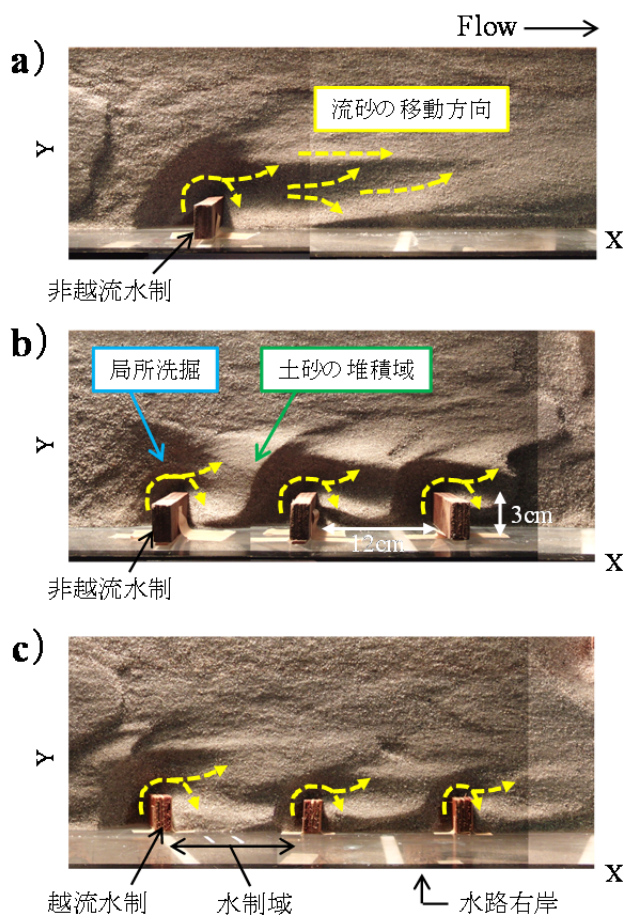


図 5.2.5 移動床上の水制まわりの河床変動と流砂の輸送経路,

a) Case M-1, b) Case M-3, c) Case M-4

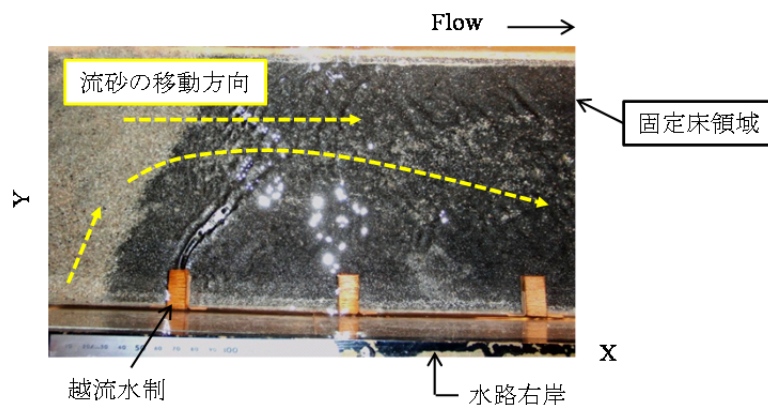


図 5.2.6 固定床上に設置した水制工まわりの流砂の輸送状況

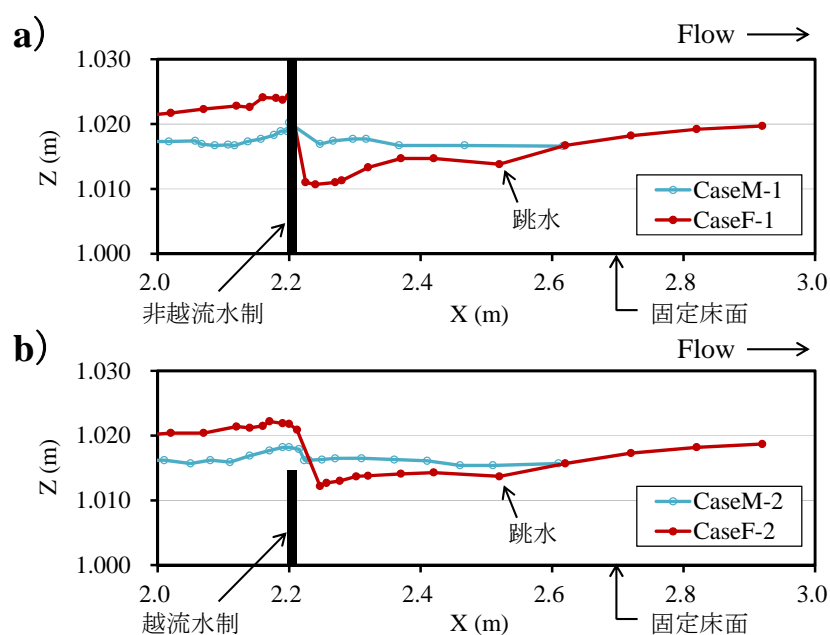


図 5.2.7 固定床と移動床上に設置した単一水制近傍の縦断水面形(右岸から 2.0cm 離れた位置),
a) 非越流水制の実験ケース, b) 越流水制の実験ケース

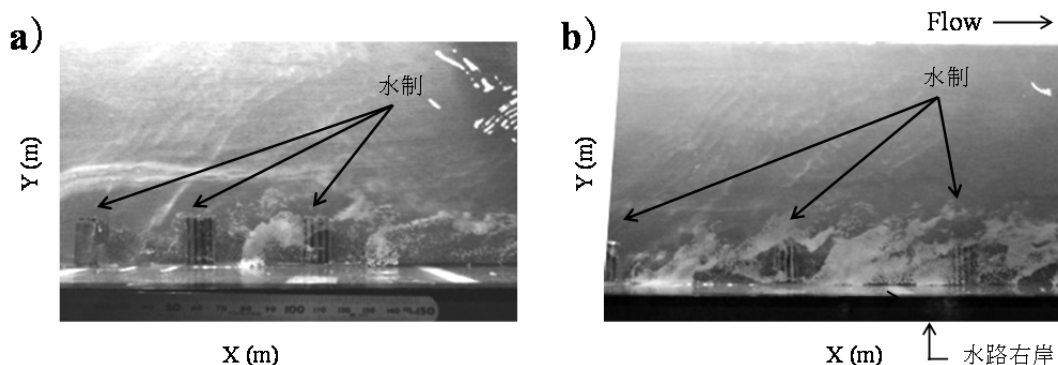


図 5.2.8 水制群まわりにおける塩化ビニル粉末(白い粒状物体)の輸送状況,
a) Case F-3, b) Case F-4

じていることが確認できる。本実験条件下では、水路上流から直線的に流れて来た固定床上の流砂は第 1 水制の上流域にてその流向を水路左岸側（水制対岸側）へと急変させ（図 5.2.6 の破線），流れの水はね領域より上流側で一度停止した後，図 5.2.6 に示す矢印上を留まることなく水路下流端まで輸送された。

次に、移動床と固定床上に水制を 1 基のみ設置した場合における、水路右岸から 2.0cm の縦断面における水位の縦断変化を図 5.2.7 に示す。図 5.2.7 より、水制近傍に局所洗掘が生じる移動床と、局所洗掘が生じない固定床とでは、水制の越流条件に関係なく水制前後の水位の縦断変化が大きく異なることが分かる。固定床では水制前後の水位差が移動床の場合よりもかなり大きく、水制下流域には跳

水現象も認められた。一方、移動床では水制前後の水位差は小さく、水制下流域の跳水現象も認められなかった。これは、移動床の場合、流砂の移動方向に沿った流砂の空間分布がほぼなくなるまで河床洗掘が生じるため、水制近傍にて水深の増大に伴う流速低下が生じ、水制前後の水位差が小さくなるためと考えられる。一方、固定床上に設置された水制の場合、その上流域に強い圧力上昇が生じるため、移動床実験よりも水制による強い水はね効果が働いていると推察される。その結果、上述の実験結果で示されたように、固定床上を流れる流砂は水制近傍まで到達するまえに対岸側へと流向を変えたと考えられる。ただし、固定床実験にて水よりも比重の軽い塩化ビニル粉末を上流から供給した場合、投入した粉末は図 5.2.8 に示すように浮遊形態で水制群の水制域へと取り込まれ、水制域内を一定時間旋回したあと主流域に取り込まれた。これより、浮遊状態に近い状態で流れる小粒径の物質ほど水制先端の水はね効果の影響を受けずに水制域へと輸送され、堆積しやすいことが分かる。その一方で、河床近傍を流れる粒径の粗い掃流形態の砂礫ほど水制域へと輸送されにくく、堆積しにくいと考えられる。

以上の結果より、固定床河川に設置された水制は、移動床河川に設置された水制と異なり、上流から十分な給砂量があったとしても水制下流域に土砂の堆積地形を殆ど創出できないことが確認された。その中でも、とくに河床近傍を流れてくる、ある程度粒径の大きな掃流砂を水制域へと捕捉することは難しいようである。そこで、次に数値解析にて固定床上に設置した単一水制周りの流れ構造を定常給水と非定常給水条件ごとに再現し、流れ、流砂の輸送特性および河床変動特性に関するより詳細な検討を行うこととする。

5.2.4. 数値解析結果と考察

(1) 固定床上に設置された水制周りの流砂特性

図 5.2.9 は数値計算による非越流水制まわりの水面形の鳥瞰図である。また、図 5.2.10 は右岸から 2.0cm の縦断面における水位の縦断変化を実験と数値解析で比較したものがある。図 5.2.10 より、数値解析の方が水制上流域の水位が実験よりやや高く、水制下流域の跳水も実験より下流側に位置しているものの、水面形の縦断変化特性は大まかに表現できており、解析精度はここで行う検討に対して十分と判断できる。

図 5.2.11 に、Case S-1 の解析で得られた流砂存在領域（白）と流砂が存在しない領域（黒）の平面分布を示す。また、図 5.2.12 に Case S-1 の河床近傍の流速ベクトル、無次元限界掃流力以上の領域（白）と無次元限界掃流力以下の領域（灰）の平面分布を示す。ここでは、長時間給砂中に流砂がわずかでも存在していれば流砂存在領域（白）と判断している。図 5.2.11 より、Case S-1 では上述の水路実験と同様に、水制周辺の広い範囲で流砂が存在せず、水制を有する断面では流砂が左岸側に偏って輸送されていることが分かる。これは、図 5.2.12 に示すとおり、水制上流域には無次元限界掃流力以下の領域が広域的に形成されるため、上流からの流砂は図 5.2.12 の矢印で示されるように水制を大きく迂回し、図 5.2.12 の破線（青）で囲まれた領域まで流れ込まないからである。ここで、図 5.2.12 を確認すると、固定床上の単一水制まわり（破線で囲まれた領域）には、流砂を水制下流域へと輸送する方向の無次元限界掃流力を越えた流れ（ $\tau_{*c} < \tau_*$ ）が形成されていることが分かる。移動床実験の場合、

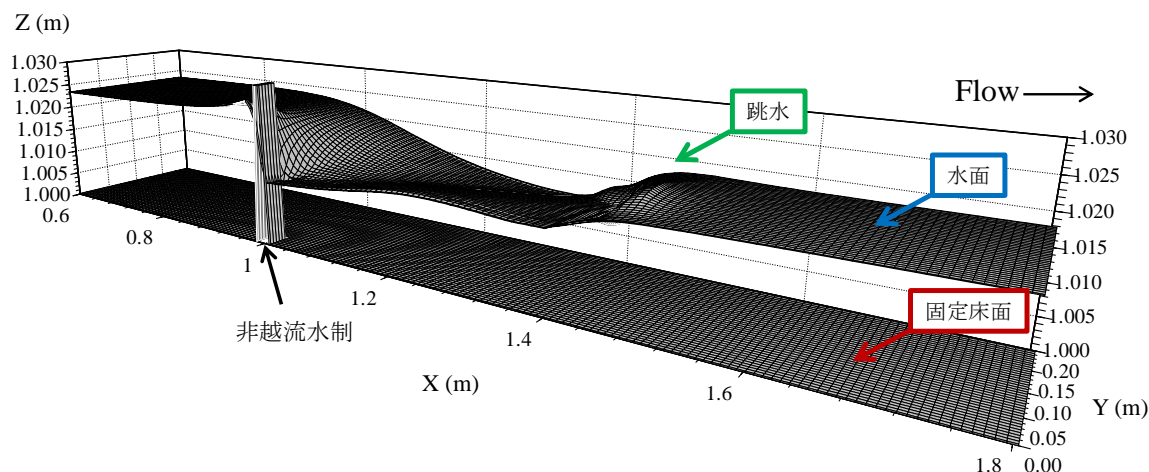


図 5.2.9 水面形の鳥瞰図 (Case S-1)

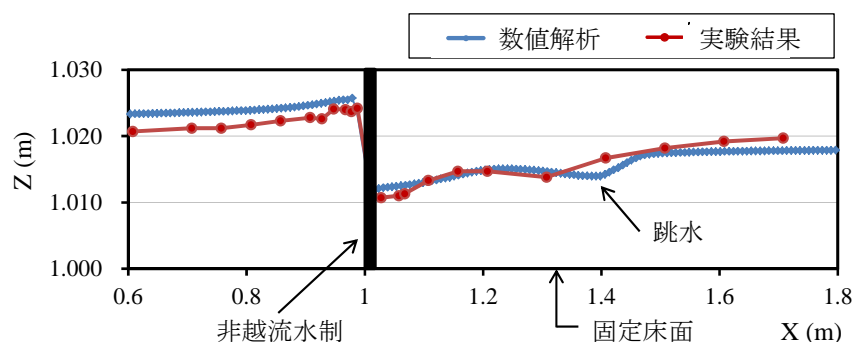


図 5.2.10 右岸から 20mm の縦断面における水位の縦断変化 (Case S-1)

水制の下流域の土砂の堆積は、水制先端部（主流側）の周辺が局所洗掘された後、その砂礫が水制下流域に運ばれて堆積することが分かっている^{9), 27)}。しかしながら、固定床上の水制の場合、上述したとおりそもそも水制近傍まで到達する流砂が存在しない（図 5.2.11）。このため、固定床上の水制は、移動床上の水制と異なり水制下流域への土砂の堆積を促進する機能が弱いといえる。この点が、移動床と固定床に設置された水制近傍における流砂の輸送特性の大きな違いである。

以上のことから、固定床上の水制は、水制先端部に水制下流域に向かう流れが形成されるにも関わらず、水制近傍に局所洗掘が形成されないために水制上流域に限界掃流力以下の領域（ $\tau_{*c} > \tau_*$ ）が広範囲で形成されやすく、流砂が第 1 水制近傍まで流れ込まないために土砂の堆積域を殆ど創出できないと分かる。このため定常給水条件の場合、上流から流れてきた掃流砂は水制周辺を迂回して流れ、通過、もしくは他の領域に堆積することになる。

(2) 非定常場における水制周りの流砂特性

次に、流れの非定常性が水制周りの流砂特性に与える影響を Case S-3 にて検討するが、その前に、Case S-3 のピーク流量に相当する $0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$ （Case S-1 の 2 倍の流量）を流した Case S-2 について検

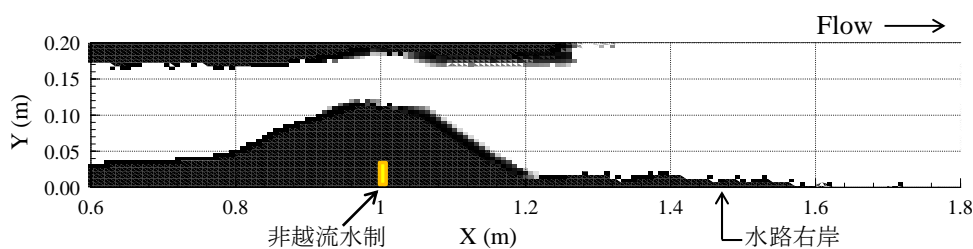


図 5.2.11 Case S-1 における流砂の輸送経路の平面図, 流砂が通過する領域(白), 流砂が一度も通過しなかった領域(黒)

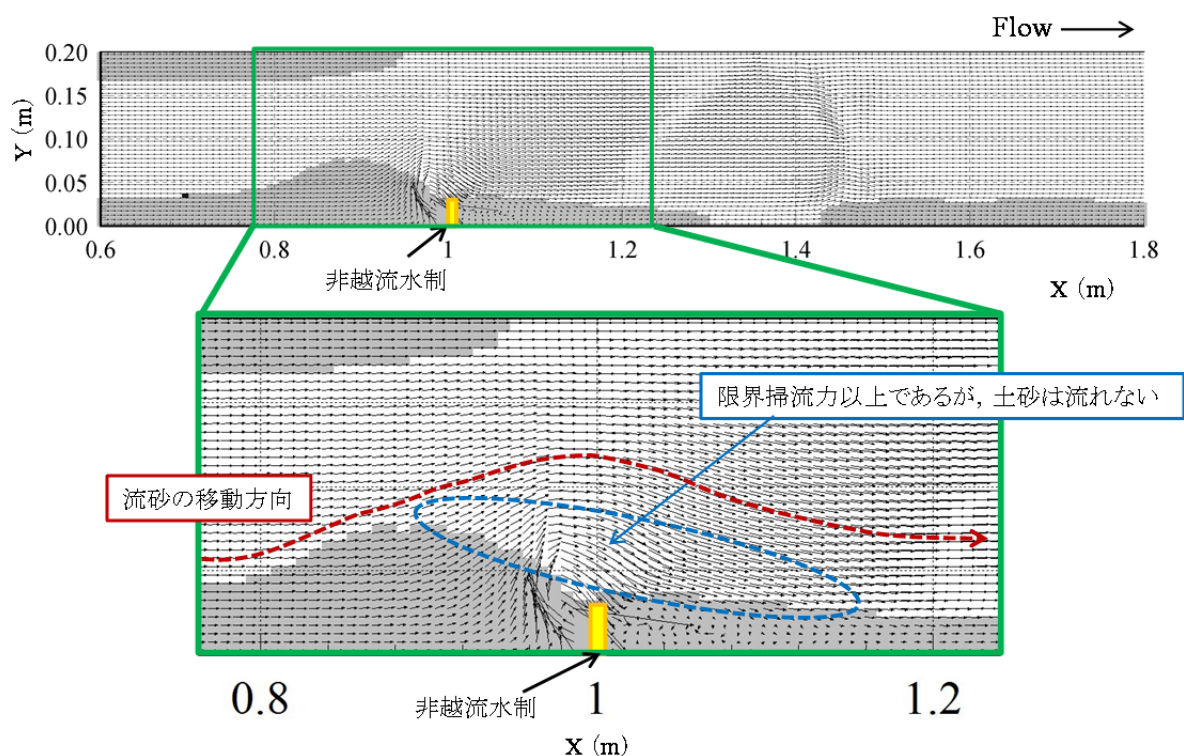


図 5.2.12 Case S-1 における河床近傍の流速ベクトル, および無次元掃流力以上の領域(白)と無次元限界掃流力以下の領域(灰)の平面分布

討する。図 5.2.13 に Case S-2 の流砂存在領域(白)と流砂が存在しない領域(黒)の平面分布を示す。流量が 2 倍になったため、当然ながら流砂存在領域(白)が増えている。

次に、図 5.2.14 に非定常の給水条件を用いた Case S-3 の流砂存在領域(白)と流砂が存在しない領域(黒)の平面分布を示す。図 5.2.13 と比較すると、流砂存在領域(白)が増えていることがわかる。これは、図 5.2.15 の増水時の水面形の例に示すように、流量の増加・減少時に水面の縦横断勾配が大きくなり、定常給水時とは異なる方向に土砂が流れるためである。図 5.2.15 (b) に示すような流量増加時の水面形では、水制下流域の水面の横断勾配が大きくなり、水制の下流域に土砂が流れ込みやすくなっている。このように、流れの非定常性は、水制下流域への土砂の輸送・交換を促進する効果があるといえる。

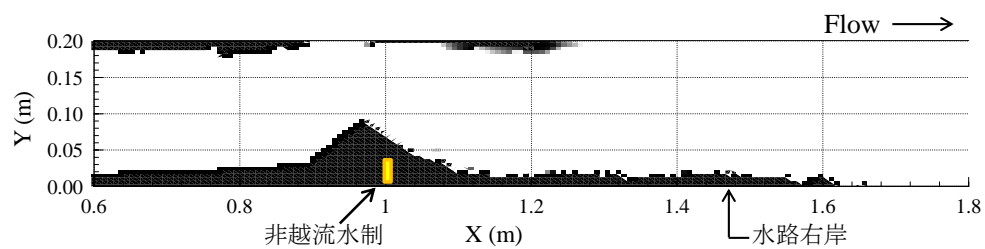


図 5.2.13 Case S-2における流砂の輸送経路の平面図, 流砂が通過する領域(白), 流砂が一度も通過しなかった領域(黒)

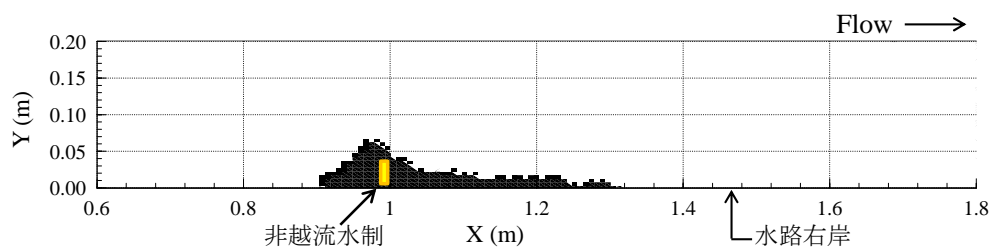


図 5.2.14 Case S-3における流砂の輸送経路の平面図, 流砂が通過する領域(白), 流砂が一度も通過しなかった領域(黒)

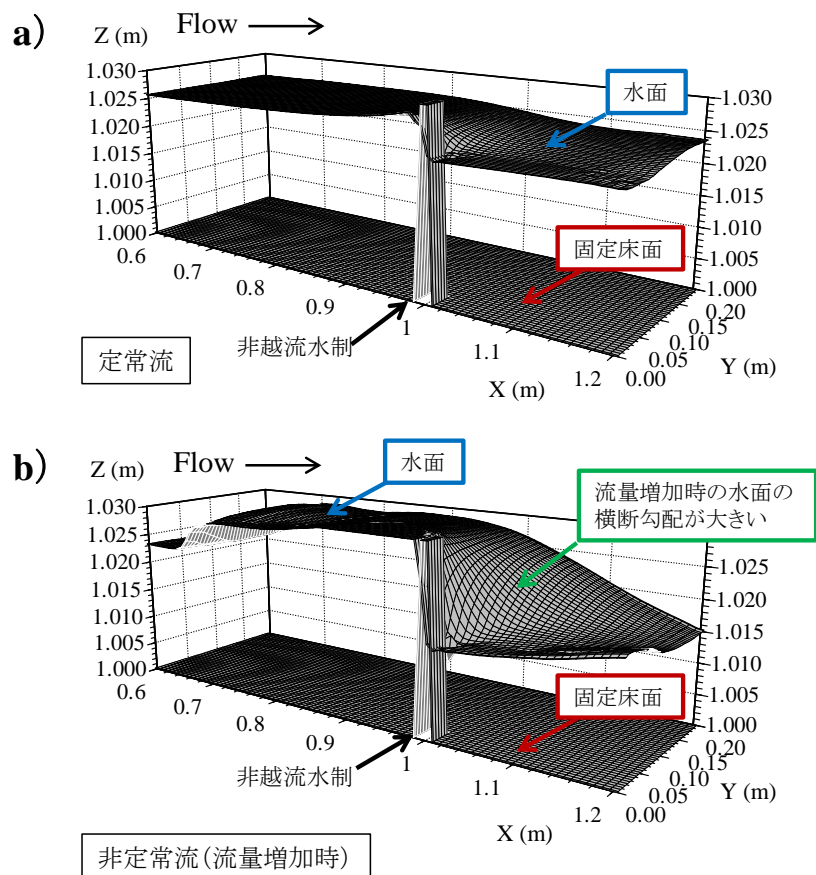


図 5.2.15 給水流量の時間変化に伴う水面勾配の変化 (Case S-3)

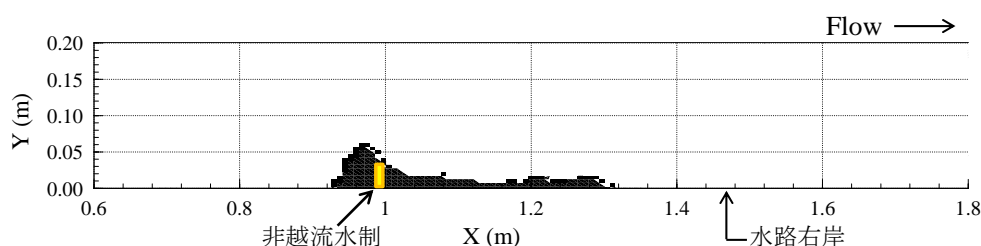


図 5.2.16 Case S-4 における流砂の輸送経路の平面図, 流砂が通過する領域(白), 流砂が一度も通過しなかった領域(黒)

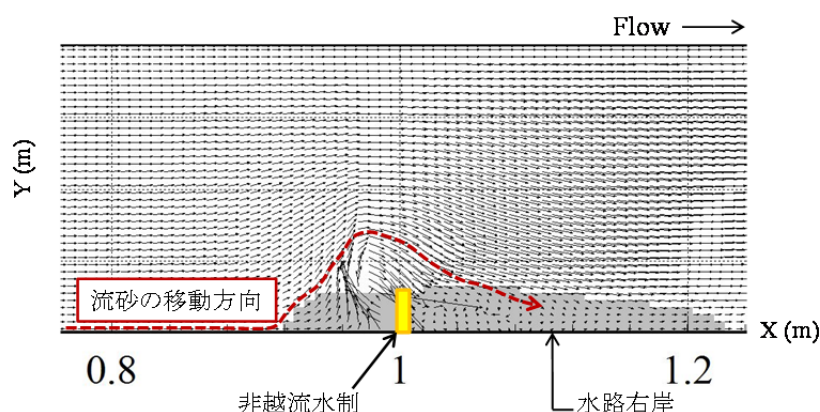


図 5.2.17 Case S-4 における河床近傍流速, および無次元掃流力以上の領域(白)と無次元限界掃流力以下の領域(灰)の平面分布

(3) 河床材料の粒径が水制周りの流砂特性に与える影響

図 5.2.16 に Case S-1 よりも小さい 0.2mm の土砂を給砂した Case S-4 の流砂存在領域(白)と流砂が存在しない領域(黒)の平面分布を示す。図 5.2.16 より, 流砂存在領域が Case S-1 よりも広がっており, 水制下流域に土砂が流れ込みやすくなっていることが分かる。これは, 粒径が小さくなったことにより, 水制上流域において, 無次元掃流力 τ_* が無次元限界掃流力 τ_{*c} を上まわる領域 ($\tau_{*c} < \tau_*$) が増え, 水制下流域への土砂の流れが出来たためである(図 5.2.17)。

これらの結果から, 水制近傍では, 流量や流砂の粒径の違いに応じた無次元掃流力の分布幅が広い。そのため, 上流から給砂された粗い土砂は, 水制下流域に堆積せずに通過することとなるが, 細かい土砂は粗い土砂よりも水制下流域に堆積し易いこととなる。

5.2.5. 結 語

本研究では, 固定床と移動床上に設置された直角水制まわりの流砂, 河床変動特性の違いを水路実験と数値解析から検討し, 次の結果を得た。

- (1) 水路実験の結果, 移動床上に設置した水制近傍には局所洗掘が形成され, その洗掘孔から pickup された砂礫が水制下流域に堆積した。その一方で, 固定床上に設置した水制近傍には

土砂が全く堆積しなかった。これは、固定床水路では上流から流れてきた流砂が第1水制上流域にてその流向を変え、水制対岸方向へと輸送されたためである。

- (2) 数値解析の結果、固定床上の第1水制先端部には、水制下流域に向かう流れ無次元限界掃流力以上の流れ ($\tau_{*c} < \tau_*$) が形成されていることが示された。しかし、固定床上の水制近傍には局所洗掘が形成されないため、水制上流域に限界掃流力以下の領域 ($\tau_{*c} > \tau_*$) が広範囲で形成されやすく、流砂は第1水制近傍まで流れ込まない。このため、固定床上の直角水制は、移動床上の直角水制と異なり水制下流域に土砂の堆積を促す効果が弱い。
- (3) 数値解析の結果、固定床上の水理条件が非定常流れの場合、水制近傍の流砂の存在する領域が定常流れに比べて広くなることが確認された。これは、流量増加時、水制前後の水面の横断勾配が大きくなり、水制下流域へと流砂が流れ込みやすくなるためである。また、固定床上を流れる流砂は、粒径が小さいほど水制近傍を通過して流れることが出来るため、水制下流域へと流れ込みやすいことが確認された。
- (4) 以上の結果から、固定床上に設置された直角水制近傍では、水理条件や流砂の粒径に違いに応じた無次元限界掃流力の分布が幅広く、砂礫の分級が活発であることが分かる。したがって、固定床領域に設置された直角水制群は、上流から供給された粗い土砂ほど水制下流域に堆積せずに通過し、細かい土砂ほど水制下流域に堆積し易いこととなる。

参考文献

- 1) Zhang H. and NAKAGAWA, H.: Scour around spur dike: recent advances and future researches, Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan, 51B, pp.633-652, 2008.
- 2) Takahashi, G. and Higashi, S: Effect of channle alteration on fish hatitat, Japanese Journal of Limnology, 45(3), pp.178-186, 1984.
- 3) 井上幹生・中野繁: 小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所, 日本生態学会誌, 44(2), pp.151-160, 1994
- 4) 金澤康史・三宅洋: コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, 応用生態工学会誌, 9(2), pp.141-150, 2006.
- 5) Hartman, K.J. and Titus, J. L.: Fish use of artificial dike structures in a navigable river, River Research and Applications, 26(9), pp.1170-1186, 2010.
- 6) Radspinner, R. R., Lightbody, A. F. and Sotiropoulos, F.: River training and ecological enhancement potential using in-stream structures, Journal of Hydraulic Engineering, 136, pp.967-980, 2010.
- 7) Shields Jr., F. D., Cooper, C. M. and Knight, S. S.: Experiment in stream restoration, Journal of Hydraulic Engineering, 121(6), pp.494-502, 1995.
- 8) Grade, R. J., Subramanya, K. and Nambudripad, K. D.: Study of scour around spur-dikes, Journal of the Hydraulics Division, 87(HY6), pp.23-37, 1961.

- 9) Duan, J. D.: Mean flow and turbulence around laboratory spur dike, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(10), pp.803-811, 2009.
- 10) Ettema, R. and Muste, M.: Scale of Effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(7), pp.635-646, 2004.
- 11) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, *水工学論文集*, 42, pp.997-1002, 1998.
- 12) Melville, B. W.: Pier and abutment scour integrated approach, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123(2), pp.125-136, 1997.
- 13) Khunle, R. A., Alonso, C. V. and Shields Jr. F. D.: Geometry of scour holes associated with 90° spur dikes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), pp.972-978., 1999.
- 14) 武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川一: ADCP を用いた水制域における流速分布計測, *水工学論文集*, 49, pp.637-642, 2005.
- 15) 崇田徳彦・清水康行・板倉忠興: 出水前後における水制近傍の河床材料調査について, *土木学会北海道支部論文報告集*, 52B, pp.158-163, 1996.
- 16) Fox J. F., Papanicolaou A. N., Hobbs B., Kramer C. and Kjos, L.: Fluid-sediment dynamics around a barb: an experimental case study of a hydraulic structure for the Pacific Northwest, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(5), pp.853-867, 2005.
- 17) 谷祖鵬・赤堀良介・池田駿介: 水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究, *混相流*, 3, pp.615-652, 2010.
- 18) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄: 止水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, *水工学論文集*, 42, pp.1057-1062, 1998.
- 19) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦: 水制に関する研究, *土木研究所報告書*, 107, pp.61-135, 1960.
- 20) 池田駿介・杉本高・吉池智明: 不透過水制群を有する流れの水理特性に関する研究, *土木学会論文集*, 656, pp.145-155, 2000.
- 21) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, 206, pp.59-69, 1972.
- 22) 竹林洋史・江頭進治・金海生: 交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級, *水工学論文集*, 41, pp.895-900, 1997.
- 23) Takebayashi, H., Okabe, T. and Shinozaki Y.: Geometric Characteristics of Bars on Layers with Rocks or Cohesive Material, *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*, pp.267-277, 2007.
- 24) 芦田和男・江頭進治・劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, *水工学論文集*, 35, pp.383-390, 1991.
- 25) Egashira, S. and Ashida, K.: Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, *Advances in Micromechanics of Granular Materials*, (Edited by H. H. Shen et al.), Elsevier, pp.391-400, 1992.

- 26) Luu, L. X., Egashira, S. and Takebayashi, H.: Investigation of Tan Chau Reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 48, pp.1057-1061, 2004.
- 27) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩: 非越流・不透過型水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.829-834, 2011.

5.3. 設置角度の異なる水制工

5.3.1. はじめに

水制工はその周りに局所洗掘や土砂の堆積を促すため、近年、単調化した移動床河川の河道内物理環境を多様化させる手法の一つとして注目されている。前節の 5.2 節では、直角水制を移動床と固定床とにそれぞれ設置し、水制近傍における流砂の輸送特性と河床変動特性の違いを比較した。その結果、移動床と固定床上に設置された直角水制では、水制近傍の流砂の移動方向が異なり、固定床上の直角水制は上流から十分な給砂を与えても水制近傍に土砂の堆積域を殆ど創出しないことが確かめられた。これは、河床が洗掘されない固定床河床の場合、第 1 水制の上流域に無次元掃流力以下の領域 ($\tau_{*c} > \tau_*$) が広範囲に形成されやすいため、上流からの掃流砂の大部分が第 1 水制近傍まで流れ込まず、水制対岸側に片寄って下流域へと輸送されるためである。

しかし、本検討では水制の設置角度や水理条件次第では、固定床河床の水制近傍に土砂を堆積させることも十分可能だと考えている。水制は、その設置角度の違いに応じて水制近傍に異なる流れ場をつくり出す。そのため、この特性をうまく利用すれば、固定床河床であっても側壁沿いに土砂の堆積域を創出させることが出来ると予想される。

水制の設置角度に注目した報告は、局所洗掘の規模や最大深、土砂の堆積位置に関するものはいくつか存在する^{1), 2), 3), 4)}など。これらは、いくつかの報告を除き^{5), 6), 7)}、水制角度 θ (図 5.3.2) が小さくなるほど局所洗掘の規模が大きくなること、および水制角度 θ が大きくなるほど逆の現象が生じることを指摘している。また、洗掘孔と土砂の堆積域の位置に着目すると、水制角度 θ が小さい場合、洗掘孔は直角水制の場合よりもやや主流域側に離れて形成されること⁸⁾、水制下流域の土砂の堆積域は直角水制の場合よりも厚く堆積することなどが報告されている^{2), 5), 3)}など。しかしながら、固定床河床に設置された角度の異なる水制を対象とした知見は、流れ場の様子を取り扱ったものが大半を占め⁹⁾¹⁰⁾など、固定床河床の水制近傍の流砂・河床変動特性を扱ったものは殆ど存在しない。したがって、固定床河床の側壁沿いに土砂を堆積させ得るような水制角度に関する知見については、殆ど分かっていない状況にある。

そこで、本節では、固定床上に設置された角度の異なる水制まわりの流砂・河床変動特性の違いを水路実験と数値解析から検討する。まず、水路実験では固定床上に角度の異なる水制群を設置し、水制近傍の流砂の輸送経路および河床変動（土砂の堆積域の創出状況）の違いについて確認する。続いて、数値解析では固定床上に角度の異なる単一水制が設置された流れ場を想定し、水制近傍の流れ、流砂、河床変動特性をより詳細に把握する。これより、水制がその設置角度の違いに応じてつくり出す流れ構造の違いを把握し、固定床河床の側壁沿いに土砂の堆積域を創出し得る水制配置について考察する。

5.3.2. 実験方法と解析方法

(1) 実験水路

実験水路の概要を図 5.3.1 に示す。水路は全長 11.0m、水路幅 0.4m の長方形矩形水路とし、水路床勾配を 1/300 に設定した。水路床にはベニヤ板を敷き、固定床を作成した。実験で用いる水制は、5.2 節の検討と同じく不透過型の直角水制工とした。水制サイズは、図 5.3.2 に示すように、全てのケースで水路右岸から水制先端部までの水路横断方向の水制投影距離（突出距離）を 5.0cm に統一した。また、水路縦断方向の水制幅は 3.0cm に統一した。水制高は越流条件によって異ならせ、非越流実験の場合は初期河床から 10.0cm、越流実験の場合は初期河床から 1.2cm 突出させた。水制の設置箇所は、全てのケースで固定床上流端より 3.2m 下流の水路右岸側に第 1 水制を配置するものとした。水制群のアスペクト比は、実河川で比較的施工数の多い値に近いもの¹¹⁾として 4.0 を採用した。水制の設置角度 θ は、図 5.3.2 に示すように、水路右岸から時計回りの回転角を示している。

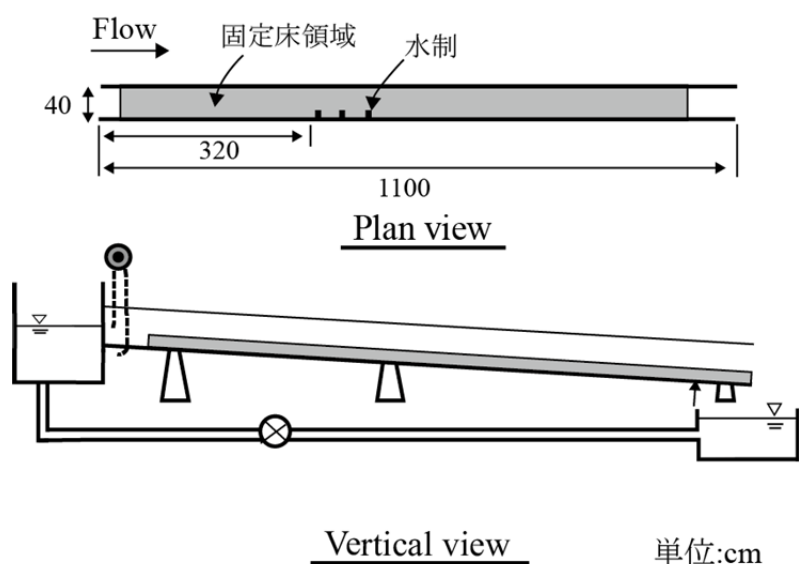


図 5.3.1 実験水路概要

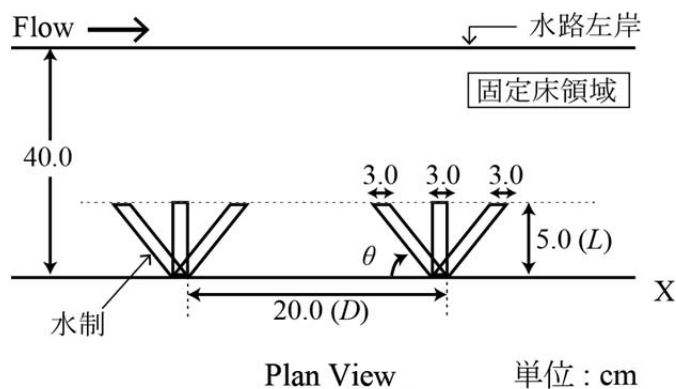


図 5.3.2 水制配置の概要

(2) 実験条件と測定項目

実験の水理条件を表 5.3.1, 実験ケースを表 5.3.2 に示す。実験では全てのケースで固定床上に片側 3 連の水制群を設置し、水制の越流条件と設置角度 θ のみを変化させた。表 5.3.2 に示す Case F-1～Case F-5 は、固定床上に非越流型の水制群を設置し、水制の設置角度 θ を $30^\circ \sim 150^\circ$ まで異ならせたものである。一方、Case F-6～Case F-10 は、固定床上に越流型の水制群を設置し、水制の設置角度 θ を $30^\circ \sim 150^\circ$ まで異ならせたものである。Case F-11 は、Case F-6 と同じ水制角度で給砂材料の粒径を大きくしたものである。

実験中の給砂条件は表 5.3.2 に示すとおりである。給砂材料は平均粒径 $d_m = 0.76 \text{ mm}$ の土砂とし、給砂量は、芦田・道上式¹²⁾にて推定される同一水理条件下の移動床河川における平衡掃流砂量の計算値 ($Q_b = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) とした。給砂の投入地点は水路上流端より 2.5m の地点とした。実験継続時間は全てのケースで 20 分間に統一し、給砂は始めの 5 分間のみ実施した。実験終了後、水制近傍の土砂の堆積状況が分かるように、水路真上から写真を撮影した。

(3) 数値解析法

数値解析は、固定床上の設置角度の異なる単一水制まわりの流れ、流砂、河床変動特性をより詳細に説明するために行った。解析プログラムは、5.2.2 節で述べた平面 2 次元河床変動計算と同様である。

表 5.3.1 水理条件

水理条件	
流量 $Q (\text{m}^3/\text{s})$	0.0048
水路幅 $B (\text{m})$	0.4
水路床勾配 I	1/300
固定床面での等流水深 $H_0 (\text{cm})$	2.7
供給砂の平均粒径 $d_m (\text{mm})$	0.76

表 5.3.2 実験ケース

実験 ケース	越流 条件	水制 角度(θ)	給砂材料 $d_m(\text{mm})$	給砂量 $Q_b (\text{m}^3/\text{s})$	給砂時間 (min.)
F-1	非越流	30°	0.76	1.2×10^{-6}	5.0
F-2		60°			
F-3		90°			
F-4		120°			
F-5		150°			
F-6	越流	30°			
F-7		60°			
F-8		90°			
F-9		120°			
F-10		150°			
F-11	越流	30°	1.54	1.2×10^{-6}	5.0

表 5.3.3 解析条件

実験 ケース	水制の 越流状況	水制の 設置角度 θ	流量 Q (m ³ /s)	供給砂の粒径 d_m (mm)
S-1	非越流	30°	0.0048	0.76
S-2		90°		
S-3		150°		
S-4	越流	30°	0.0048	0.76
S-5		90°		
S-6		150°		
S-7	越流	30°	0.0144	0.76
S-8		90°		

(4) 解析条件

数値解析の計算領域は、長さ 3.0m、幅 0.4m、勾配 1/300 の固定側岸を有した直線矩形水路とした。初期河床形状は平坦床とし、上流から 1.5m の地点の右岸側に、横断方向の突出長さ L が 5.0cm の非越流型の水制、あるいは越流型の水制を 1 基設置するものとした。上流境界からの給砂量は、土砂が固定床上のどの領域を流れるかを明らかにするため、計算領域の主流域に相当する固定床上に土砂が堆積しないように平衡掃流砂量の 1/3 倍を与えるものとした。

表 5.3.3 に解析条件を示す。表 5.3.3 に示す Case S-1～Case S-3 は、上述の水路実験における非越流水制の Case F-1, Case F-3, Case F-5 と同じ設置角度の水制を用いた解析条件である。Case S-4～Case S-6 は、上述の水路実験における越流水制の Case F-6, Case F-8, Case F-10 と同じ設置角度の水制を用いた解析条件である。Case S-7 と Case S-8 は、Case S-4 と Case S-5 の 3 倍の流量を与えたものであり、流量の増加による水制近傍の流砂特性の変化を検討するものである。

5.3.3. 実験結果と考察

水路実験の結果、Case F-1～Case F-5 の非越流状態の水制群では、いずれも水制近傍に土砂の堆積域が形成されなかった。これは、図 5.3.3 に示すとおり、上流からの掃流砂は第 1 水制上流域においてその流向を主流方向に傾け、第 1 水制近傍まで掃流砂が全く到達しなかったためである。

Case F-6～Case F-11 の越流状態の水制群では、図 5.3.4 a) に示すように水制を上向きに鋭角に設置した Case F-6 および Case F-11 のみ、水制近傍に明瞭な土砂の堆積域が形成された。これは、上流からの掃流砂が第 1 水制上流部と水路右岸とに挟まれた領域まで流れこみ、そこに堆積した後、土砂の堆積厚が増大するに伴って堆積した砂礫の一部が水制頂部を越流して第 2, 第 3 水制上流域へと輸送されたためである。

一方、Case F-7～Case F-10 の場合、Case F-7 と Case F-8 では第 1 水制直上流部にのみ小規模な土砂の堆積域が形成され（図 5.3.4 b)）、Case F-9 と Case F-10 では水制近傍に土砂の堆積域が殆ど形成されなかった。これは、Case F-7～Case F-10 の場合、上流からの掃流砂は Case F-6 の場合と同様に第 1

水制近傍まで輸送されたが、その後、掃流砂は主流方向に流出し、第1水制の水制頂部を超えて第2、第3水制上流域まで流れ込む砂礫が存在しなかったためである。

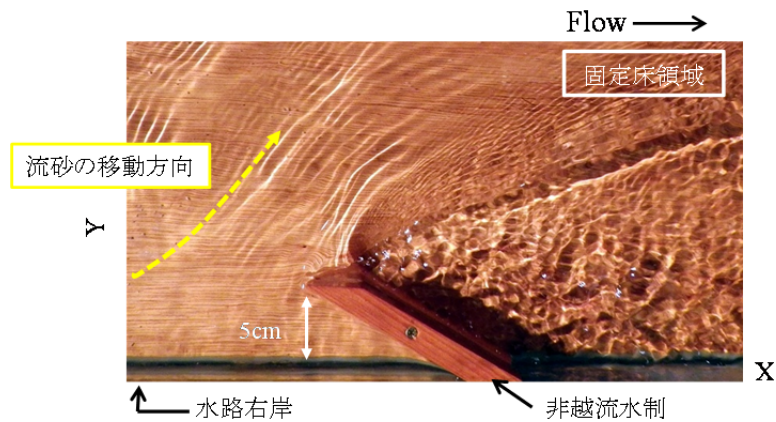


図 5.3.3 非越流状態の水制群近傍の流れと掃流砂の移動経路 (Case F-1, $\theta = 30^\circ$)

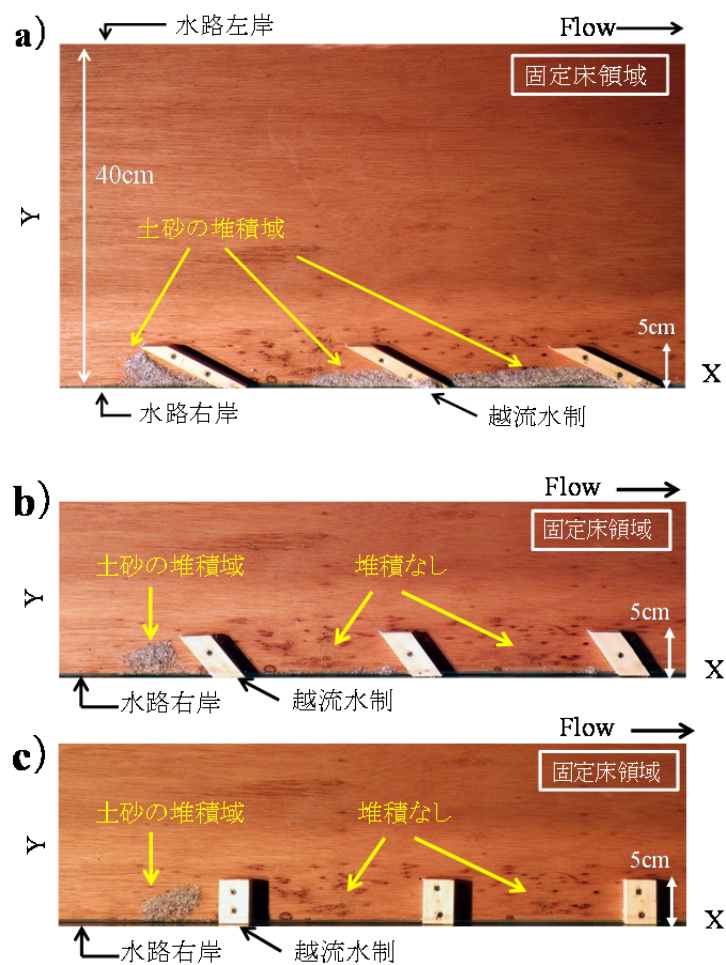


図 5.3.4 越流状態の水制群近傍の流れと掃流砂の移動経路,

a) Case F-6 ($\theta = 30^\circ$), b) Case F-7 ($\theta = 60^\circ$), c) Case F-8 ($\theta = 90^\circ$)

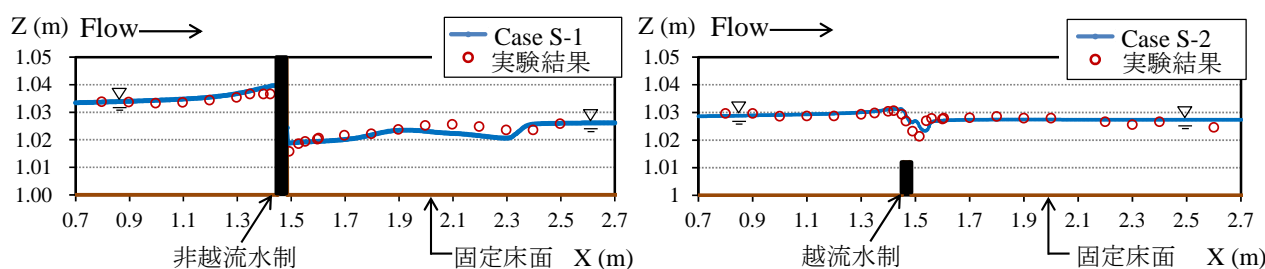


図 5.3.5 実験と数値計算における水制近傍の水位の縦断変化($Y=2.0\text{cm}$),
左)Case S-1(非越流水制, $\theta=30^\circ$), 右)Case S-2(越流水制, $\theta=30^\circ$)

5.3.4. 数値解析結果と考察

図 5.3.5 に、水路実験と数値解析における設置角度 $\theta = 30^\circ$ の非越流水制と越流水制まわりの水位の縦断変化（水路右岸より 2.0cm 離れた位置）を示す。図 5.3.5 より、非越流水制と越流水制の計算結果は、いずれも実験の水面形の縦断変化特性を大まかに表現できており、解析精度はここで行う検討に対して十分と判断できる。

(1) 非越流水制まわりの流砂特性

図 5.3.6 に、Case S-1～Case S-3 における非越流状態の水制近傍の河床近傍の流速ベクトルと、無次元限界掃流力以下の領域（灰）の平面分布、および計算中に通過した総掃流砂量の平面分布を示す。図 5.3.6 の総掃流砂量の平面分布は、赤色が濃い場所ほどより多くの流砂が通過したことを示す。

図 5.3.6 によると、Case S-1～Case S-3 の流砂の輸送経路（破線）は、いずれの計算結果も上述の実験結果と同様に、流砂が非越流水制の上流域にて流向を変え、水路左岸側に偏って輸送されている。これは、水制上流域には無次元限界掃流力以下の領域（ $\tau_{*c} > \tau_*$ ）が広域的に形成されるため、上流からの流砂は図 5.3.6 の矢印で示されるように水制を大きく迂回し、水制近傍の領域まで流れ込まないからである。さらにこの傾向は、Case S-1～Case S-3 を比較すると、水制を上向きに設置した Case S-1（図 5.3.6 a）にて最も明瞭に認められることが分かる。これは、図 5.3.7 に示すとおり、上向き水制ほど水制上流域の堰上げ背水が長距離に渡って生じやすいため、無次元限界掃流力以下の領域が広範囲に形成されるためである。したがって、固定床上に設置された非越流水制は、いずれの設置角度であっても水制近傍に土砂の堆積域を創出する機能が弱く、その傾向は上向き水制ほど顕著に現れるものと推察される。

(2) 越流水制まわりの流砂特性

図 5.3.8 に、Case S-4～Case S-6 における水制近傍の河床近傍の流速ベクトルと、無次元限界掃流力以下の領域（灰）の平面分布、および計算中に通過した総掃流砂量の平面分布を示す。図 5.3.8 によると、Case S-4～Case S-6 は上述の非越流状態の水制の場合と異なり、いずれのケースも流砂が水制近傍まで到達している。しかし、図 5.3.8 にて各ケースの水制上流域での流砂の輸送経路を比較すると、水制を上向きに鋭角に設置した Case S-4 でのみ、水制上流域の流砂の移動方向が 2 方向に分岐す

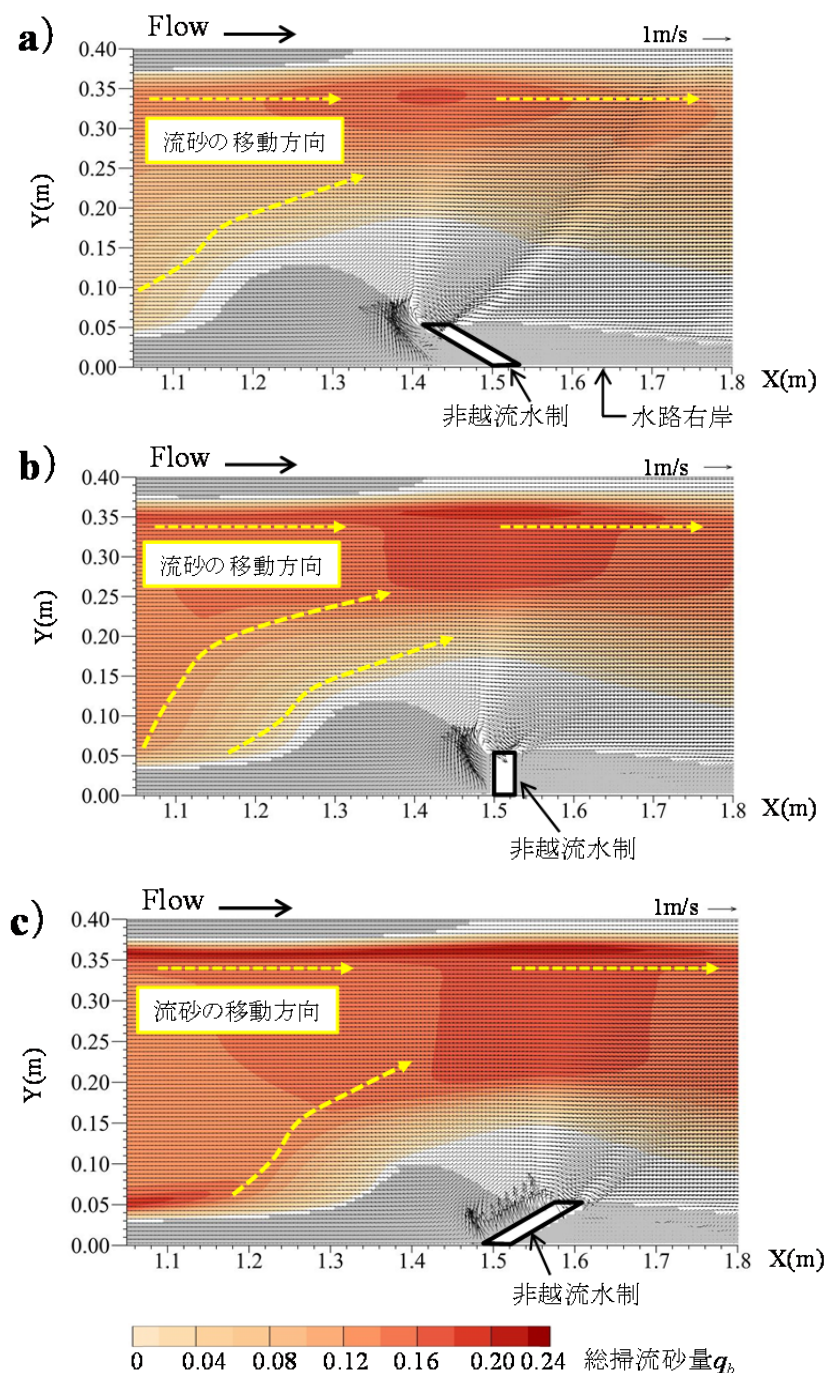


図 5.3.6 非越流水制まわりの河床近傍流速ベクトル, 無次元限界掃流力以下の領域(灰)の平面分布, 計算中に通過した総掃流砂量の平面分布,
a) CaseS-1 ($\theta=30^\circ$), b) CaseS-2 ($\theta=90^\circ$), c) CaseS-3 ($\theta=150^\circ$)

る様子が確認できる。これは、図 5.3.8 a) に示す Case S-4 の河床近傍流速ベクトルが示すとおり、水制を上向きに設置した場合のみ、水制上流域の河床近傍流れが水制根元部の方向に流れこむためである。つまり、上述の水路実験 Case F-6 にて水制近傍に土砂が明瞭に堆積した理由は、この水制根元部に向かう流れが流砂を水制直上流部まで輸送し、その後、その流砂が水制頂部を超えたためと言える。

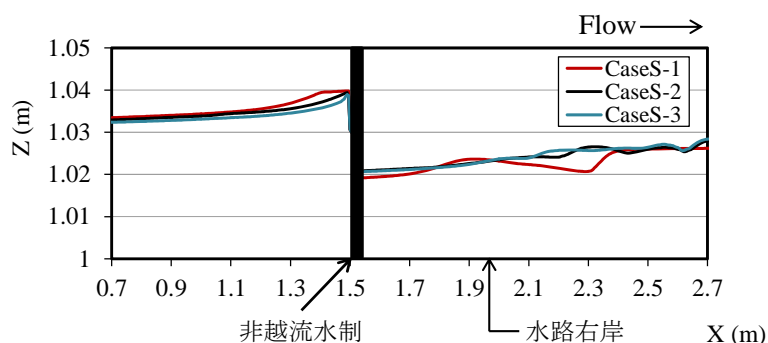


図 5.3.7 非越流水制近傍の水路右岸沿いの水位の縦断変化 (Y=0.25cm)

一方、図 5.3.8 b) と図 5.3.8 c) によると、Case S-5 と Case S-6 の流砂の移動方向は、水制上流域に 2 方向に分岐せず、全て主流方向に輸送されることが分かる。これは、Case S-5 と Case S-6 は、Case S-4 と異なり水制上流域の河床近傍流れが水制根元部の方に流れ込まず、主流方向にのみ偏向して流れるためである。

したがって、固定床上に設置された越流水制は、上流向きに鋭角に水制を設置した場合のみ水制根元部の方向に流砂を輸送する流れが形成され、第 1 水制上流部に土砂が明瞭に堆積すると言える。一方、それ以外の設置角度の越流水制は、水制近傍まで流砂が流れこむにも関わらず、第 1 水制上流部に明瞭な土砂の堆積域を殆ど形成しないものと推察される。

(3) 流量の違いが水制まわりの流砂特性に与える影響

図 5.3.9 に、Case S-7 と Case S-8 における水制近傍の河床近傍の流速ベクトルと、無次元限界掃流力以下の領域(灰)の平面分布、および計算中に通過した総掃流砂量の平面分布を示す。図 5.3.9 a) は、水制を上向きに鋭角に設置した Case S-4 (図 5.3.8 a)) の流量を 3 倍にした Case S-7 の計算結果である。Case S-7 と Case S-4 を比較すると、Case S-7 は流量の増加に伴い水制根元部に流れ込む河床近傍流れが強まり、それに伴い水制根元部に流れ込む流砂量も増大することが分かる。

一方、図 5.3.9 b) は、水制を直角に設置した Case S-5 (図 5.3.8 b)) の流量を 3 倍にした Case S-8 の計算結果である。Case S-8 では、Case S-5 と同様に水制上流部において流砂が第 1 水制の根元部まで流れ込むものの、その後、砂礫は主流方向へのみ輸送されることがわかる。これは、Case S-8 のような直角水制の場合、流量が増加するほど水制先端部における水はね効果が強まり、水制直上流部から主流域へ向かう流れが強くなるためである。したがって、上向きに鋭角水制は流量が変動しても水制上流部に流砂の流れを呼び込む機能が認められるが、直角水制のように鈍角な越流水制の場合、流量が増加するほど第 1 水制の直上流域にまで流れ込む土砂量は増えるものの、そこに堆積した土砂は第 1 水制上部を超えて第 2、第 3 水制の水制域内に堆積するよりも主流方向へと流されやすいと推察される。

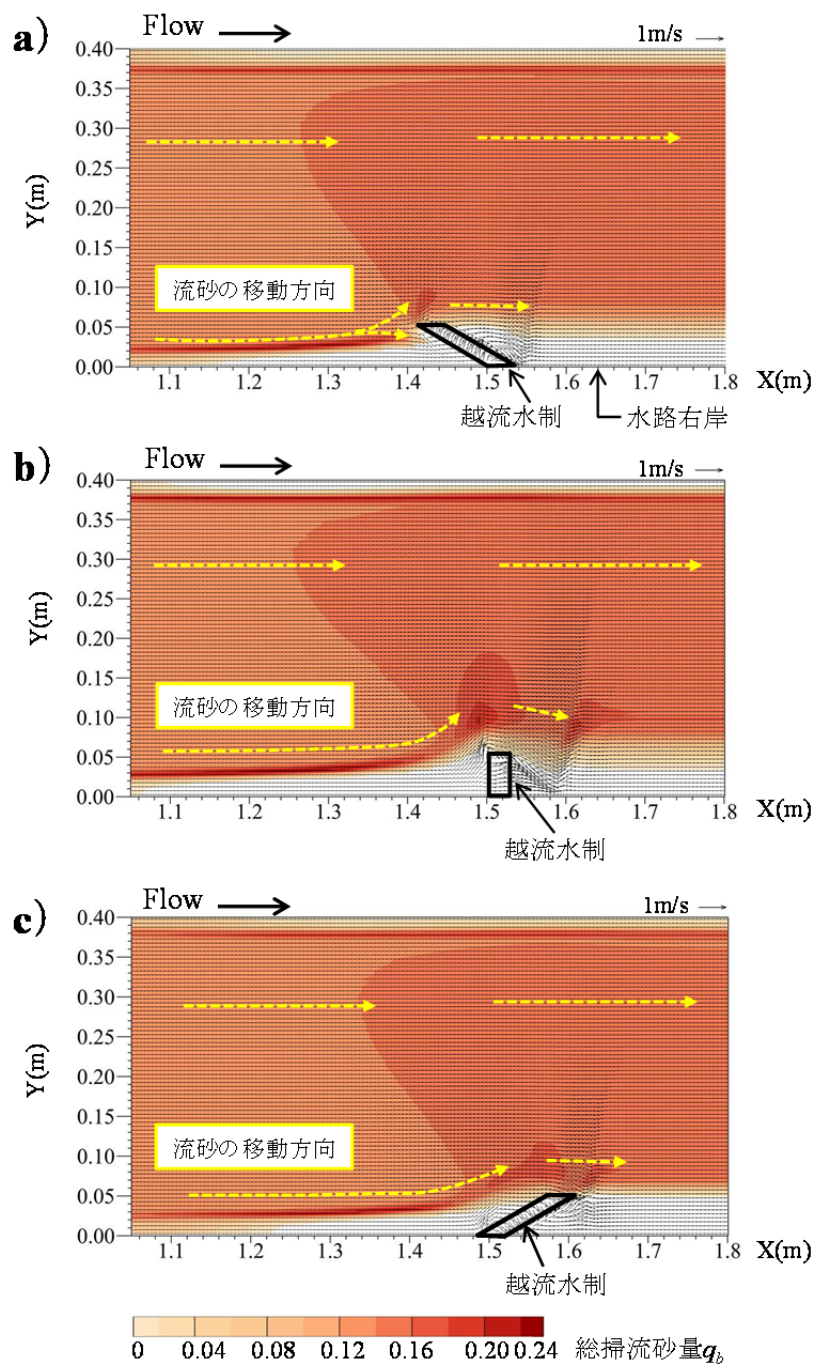


図 5.3.8 越流水制まわりの河床近傍流速ベクトル，無次元限界掃流力以下の領域（灰）の平面分布，計算中に通過した総掃流砂量の平面分布，
a) Case S-4 ($\theta = 30^\circ$), b) Case S-5 ($\theta = 90^\circ$), c) Case S-6 ($\theta = 150^\circ$)

5.3.5. 結語

本研究では，固定床上の設置角度の異なる水制まわりの流砂・河床変動特性の違いを水路実験と数値解析から検討し，次の結果を得た。

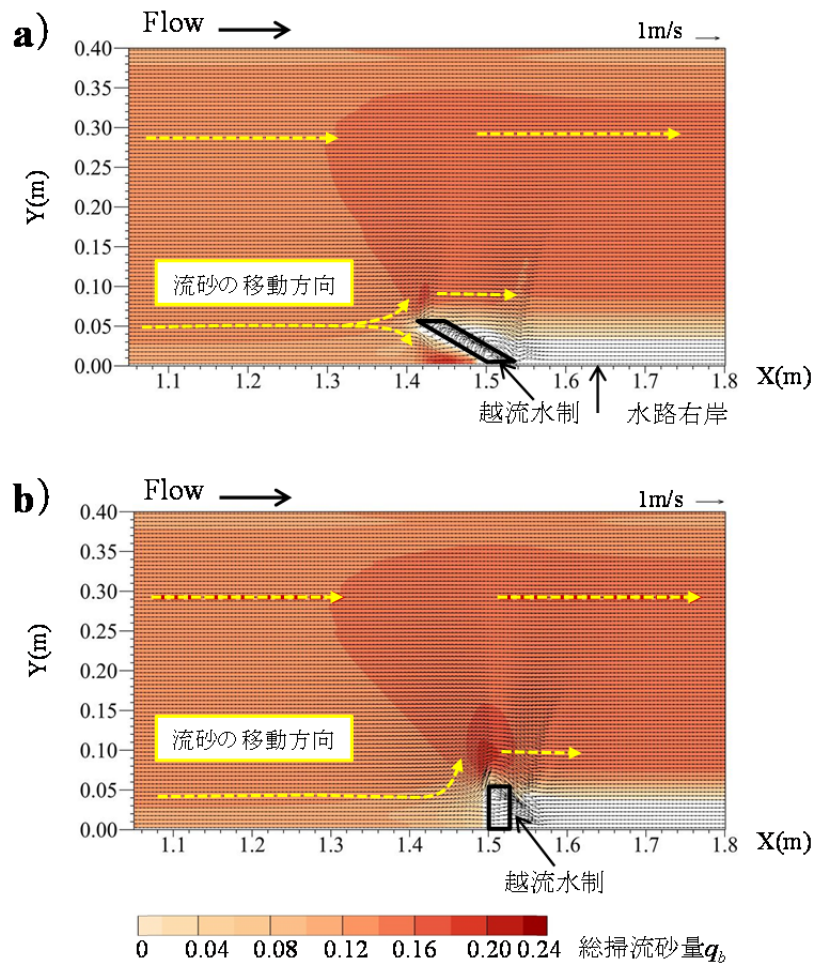


図 5.3.9 越流水制まわりの河床近傍流速ベクトル，計算中に通過した総掃流砂量の平面分布，

a) Case S-7 ($\theta=30^\circ$ ，Case S-4 の流量 3 倍に相当)

b) Case S-8 ($\theta=90^\circ$ ，Case S-5 の流量 3 倍に相当)

- (1) 水路実験の結果，固定床上に設置された水制近傍に土砂の堆積域が明瞭に創出されたのは，越流状態の上向きの鋭角水制 ($\theta=30^\circ$) のみであった。
- (2) 数値解析の結果，固定床上に設置された単一の非越流型の水制近傍には，設置角度に関係なく流砂が水制対岸側へと偏って輸送される状況が確認された。これは，固定床領域では水制近傍が局所洗掘されないため，水制上流域に無次元限界掃流力以下の領域 ($\tau_{*c} > \tau_*$) が広範囲で形成されやすいためである。さらに，この傾向を水制の設置角度で比較すると，上流向きの鋭角水制ほど水制上流域に広範囲で無次元限界掃流力以下の領域 ($\tau_{*c} > \tau_*$) が形成されやすく，流砂が水制から離れた場所を流ることが示された。
- (3) 固定床上に設置された単一の越流水制まわりには，非越流水制の場合と異なり，いずれの水制角度においても水制近傍まで流砂が到達することが確認された。しかし，水制近傍の流砂の移動方向を水制の設置角度で比較すると，上向きの鋭角水制 ($\theta=30^\circ$) のみ，水制上流

域において水制根元部に向かう流砂の流れが認められた。これは、上向きの鋭角水制の場合、水制直上流部の河床近傍流れが主流方向と水制根元部の2つの方向に分岐するためである。さらに、この傾向は流量が増加するほど強くなる。したがって、増水時に上流からある程度の掃流砂が供給される固定床河川あれば、河道上の一部に土砂を堆積させる手法として、水制高の低い上向きの鋭角水制は十分に効果を発揮することが期待される。

5.4. 結 論

本章では、はじめに移動床と固定床に設置された直角水制まわりの流砂の輸送・河床変動特性の違いを明らかにし、そのうえで固定床河川の河岸沿いに土砂の堆積域を創出し得る水制配置の検討を行った。これより次の結論を得た。

- (1) 水路実験の結果、移動床上に設置した直角水制近傍には局所洗掘が形成され、その洗掘孔から pickup された砂礫が水制下流域に堆積した。その一方で、固定床上に設置した水制近傍には土砂が全く堆積しなかった。これは、数値解析の結果によると、固定床上の水制近傍には局所洗掘が形成されないために水制上流域に限界掃流力以下の領域 ($\tau_{*c} > \tau_*$) が広範囲で形成されやすく、流砂は第1水制近傍まで流れ込まないためである。このため、固定床上の直角水制は、移動床上の直角水制と異なり水制下流域に土砂の堆積を促す効果が弱いことが示された。この他、固定床上に設置された直角水制近傍では、水理条件や流砂の粒径に違いに応じた無次元限界掃流力の分布が幅広く、砂礫の分級が活発である。このため、固定床領域に設置された直角水制群まわりでは、上流から供給された粗い土砂ほど水制下流域に堆積せずに通過し、細かい土砂ほど水制下流域に堆積し易いこととなる。
- (2) 固定床河川の河岸沿いに土砂の堆積域を創出し得る水制配置として明らかに効果を有するものは、越流状態の上向きの鋭角水制 ($\theta = 30^\circ$) のみであった。これは、上向きの鋭角水制の場合、水制直上流部の河床近傍流れが主流方向と水制根元部の2つの方向に分岐するためである。さらに、この傾向は流量が増加するほど強くなる。したがって、増水時に上流からある程度の掃流砂が供給される固定床河川あれば、河道上の一部に土砂を堆積させる手法として、水制高の低い上向きの鋭角水制は十分に効果を発揮することが期待される。

参考文献

- 1) Cherry, J. and Beschta, R. L.: Coarse woody debris and channel morphology: a flume study, Water Resources Bulletin, 25(5), pp.1031-1034, 1989.
- 2) Melville, B. W.: Local scour at bridge abutments, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,

- 118(4), pp.615-631, 1992.
- 3) 松本大三・富永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 50, pp.1009-1014, 2006.
 - 4) 富永晃宏・田本典秀: 越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 48, pp.805-810, 2004.
 - 5) Khunle, R. A., Alonso C. V. and Shields Jr. F. D.: Local scour associated with angle spur dikes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12), pp.1087-1093., 2002.
 - 6) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 42, pp.997-1002, 1998.
 - 7) 大本照憲・平川隆一・渡邊訓甫: 非越流型水制群の向きが河床変動と流れ構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, 8, pp.875-882, 2005.
 - 8) 李最森・道奥康治・前野詩朗・和中隆志: 捨石透過水制を配した開水路における流れと河床変動, 水工学論文集, 51, pp.817-822, 2007.
 - 9) 川口広司・岡信昌利・福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 44, pp.1065-1070, 2000.
 - 10) 川口広司・渡邊明英・福岡捷二: 異なる角度の越流型水制周辺流れの二次元数値解析, 水工学論文集, 45, pp.385-390, 2001.
 - 11) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告, 107, pp.61-135, 1960.
 - 12) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 206, pp.59-69, 1972.

第6章 固定床河川の類型化と環境修復技術に関する提案

6.1. 概 説

本章では、第3章～第5章にて検討した固定床河床の水理特性や流砂・河床変動特性を踏まえたうえで、固定床領域を有する中小河川における「治水・利水・環境」を満足する河川整備の考え方について検討する。本章の構成は以下のとおりである。6.2節では、固定床河川の代表としてコンクリート三面張り河川を取り上げ、河道内物理環境の違いから河川の類型化を行う。次いで、類型化されたコンクリート三面張り河川に露岩河川を加え、各々の固定床河川のタイプに適する水制工を利用した環境修復について考察する。

6.2. 固定床河川の類型化と水制を利用した環境修復技術の提案

6.2.1. はじめに

河床から土砂の堆積層が消失した固定床領域を有する河川は、露岩河川やコンクリート三面張り河川など、全国各地の市街地や農村地域に分布する。このような固定床河川では、今日、河道内物理環境の単調化に伴う水圏生態系の劣化が懸念視されている。たとえば、金澤・三宅¹⁾によると、固定床河床の流れの速さや河床材料の消失は、特殊な環境に耐えられる限られた生物種のみが優位に卓越する単純な生物相をもたらすことなどが報告されている。このような状況に鑑み、近年、固定床化の進行する河川においても、ある程度良好な河川環境を確保するための環境修復事業が実施されつつある。しかしながら、これらの検討は個別の河川を対象に実施されたものが大半を占め、固定床河川の水理特性や流砂・河床変動特性にまで踏み込んで検討したものは非常に少ない²⁾。さらには、こうした市街地や農村地域を流れる中小河川の露岩化の規模やコンクリート三面張り河川への改修度合に関する資料も限られており、現状ではどのような水理特性や河道内物理環境を有する固定床河川が各地に点在するかについても殆ど整理されていない状況にある。

このような背景から、本検討では、はじめに固定床河川としてコンクリート三面張り河川を取り上げ、水生生物の生息状況と密接に関係すると考えられる河道内物理環境を用いた河川の類型化を試みる。これは、固定床河川を物理環境から類型化することができれば、河川の類型タイプごとに適する環境修復の方法や検討すべき項目を事前に予測するなど、具体的な対策の見通しが立てやすくなると考えられるためである。次いで、これらの河川の類型タイプに露岩河川を加え、第4章～第5章で得

られた固定床河床の流砂・河床変動特性の知見を踏まえたうえで、河川の類型タイプ毎に水制工を利用した環境修復技術について考察する。なお、ここでコンクリート三面張り河川を取り上げた理由は、露岩河川に比べて対象河川が多数存在すること、規模が小さいために河床勾配や蛇行度、植生の繁茂状況、土砂の供給条件等の物理指標の計測が容易であるためである。

コンクリート三面張り河川は堤防上や堤防近くまで土地利用されている場合が多く、社会的制約から確実な治水対策が求められると共に、堤外地を拡張することで河道内に砂州の形成を促すような方法を採用することは難しい。このため、既存のコンクリート三面張り河川（あるいは露岩河川）を対象とした環境修復事例（2.2 節参照）は、固定床河床の一部に土砂の堆積域を創出することを目的としたものが大半を占めている。これらの事例では、固定床上に置土や水制を施工することで、魚類をはじめとする水生生物群集の生息状況にある程度の改善が認められることが報告されている。本論文の第3章においても、武庫川水系池尻川にて河道内物理環境と底生動物群集の生息状況との関係性を評価した結果、コンクリート製河床であっても河道横断方向の植生のカバー率（被覆率）が10%程度を上回るあたりから底生動物の種類数が増加することが示されている。これらのことを考慮すると、固定床河川であっても河道内に十分な土砂の堆積や植生領域が存在すれば、ある程度多様な生態系の成立する流れ場が成立するものと期待できる。これより、本検討ではコンクリート三面張り河川において河道横断方向の植生のカバー率に注目し、このカバー率に影響を与える物理環境から固定床河川の類型化を試みる。その後、得られた固定床河川の類型タイプごとに、環境修復技術の一つとして河岸沿いに土砂の堆積域や流れの緩流域を創出し、植生繁茂を促すための水制配置について考察する。

6.2.2. 方法

(1) 調査地域と調査項目

調査地域は関西地区の千里ニュータウン（大阪府）、洛西ニュータウン（京都府）、北摂三田ニュータウン（兵庫県）を含む3地域とし、これらの地域を流れる1級河川、2級河川、準用河川、普通河川、および一部主要な水路を対象とした。表 6.2.1 に、調査地域周辺を流れる河川名と河川区分、河床の状態、および物理指標の調査地点の有無について示す。また、図 6.2.1～図 6.2.3 に、各調査地域を流れる各河川の位置と調査地点を示す。

類型化用の物理指標の調査項目は、コンクリート三面張り河川の水生生物群集の生息状況に影響すると考えられる項目として、河道内の植生のカバー率（地点4のみ土砂によるカバー率）に注目した。また、この植生のカバー率に影響を与える物理指標として、河床勾配、川幅、蛇行度、流域面積、河川上流端の条件の5つを選定した。各調査項目の計測方法は以下のとおりである。まず、植生のカバー率は、調査地点の川幅に対する植生の河道横断方向に占める比率として定義し、現地で撮影した写真から最大カバー率を求めた。次に、河床勾配と川幅は、各調査地点において LTI TruPulse 360/360B（Laser Technology, Inc 製）を用いて計測を行った後、得られた値をトータルステーションによる詳細な測定値との比較から補正を行った。調査地点の蛇行度と流域面積は、2万5千分1地図を用い手作業で算出した。河川上流端の条件は、コンクリート三面張り河川の土砂供給条件を把握するために河川上流端がため池かどうかを調べたものであり、ため池のみである場合を0、それ以外の場合を1と

して整理した。

現地調査は2012年12月8日～12日および2014年3月14日～15日に実施した。植生のカバー率は、両調査日程にて河道内に植生繁茂が認められた地点のみ、水路横断方向の最大カバー率を求めることとした。

(2) 類型化に関する解析方法

物理指標を用いた類型化の手法には、非線形回帰分析のひとつである樹木モデルの回帰木分析（regression tree analysis）を用いた。回帰木分析に用いる物理指標には、コンクリート三面張り河川に生息する生物群集の重要な生息場所であると推察される植生のカバー率を目的変数とし、その他の物理指標を目的変数に対する説明変数であるとした。ただし、川幅と流域面積に関しては両者の相関が非常に高かったため、ここでは川幅 / 流域面積で除し、集水域の大きさに対する川幅比を用いることとした。回帰木分析の解析には、R 言語（R x64 3.0.3）の tree パッケージを用いた。

表 6.2.1 図 6.2.1～図 6.2.3 に示す調査地域周辺の河川概要と物理指標調査の有無

調査地域周辺の河川		河川区分	河床の状態	物理指標 の調査地点数
洛西ニュータウン	小畑川	一級河川	移動床	—
	上里川	普通河川	コンクリート	4 地点
	北川	普通河川	コンクリート	2 地点
	千丈川	普通河川	コンクリート	2 地点
	二升川	準用河川	コンクリート	—
	下狩川	準用河川	コンクリート	—
千里ニュータウン	藤白台第1水路	—	コンクリート	1 地点
	藤白台第2水路	—	コンクリート	2 地点
	古江台第1水路	—	コンクリート	—
	古江台第2水路	—	コンクリート	—
	山田川	一級河川	コンクリート	—
	正雀川	一級河川	コンクリート	—
	天竺川	二級河川	コンクリート	—
	兎川	二級河川	コンクリート	—
北摂三田ニュータウン	武庫川	二級河川	移動床（一部露岩化）	—
	池尻川	二級河川	コンクリート	2 地点
	大原川	二級河川	コンクリート	1 地点
	大池川	二級河川	コンクリート	—
	平谷川	二級河川	石張りコンクリート、下流域は移動床	—
	沢谷川	二級河川	コンクリート	1 地点
	須丸川	二級河川	コンクリート	1 地点
	内神川	二級河川	コンクリート、下流域は移動床	2 地点

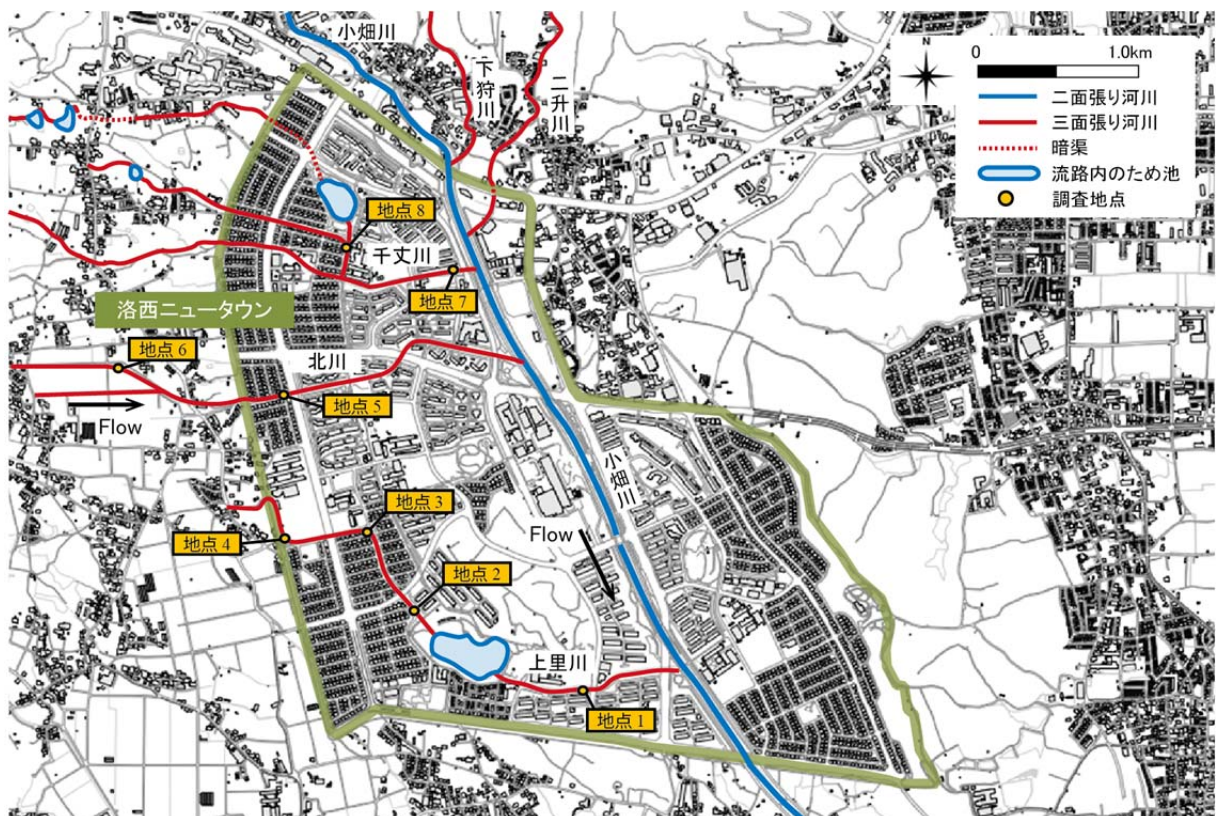


図 6.2.1 洛西ニュータウン(京都府)周辺を流れる河川と物理指標の調査地点

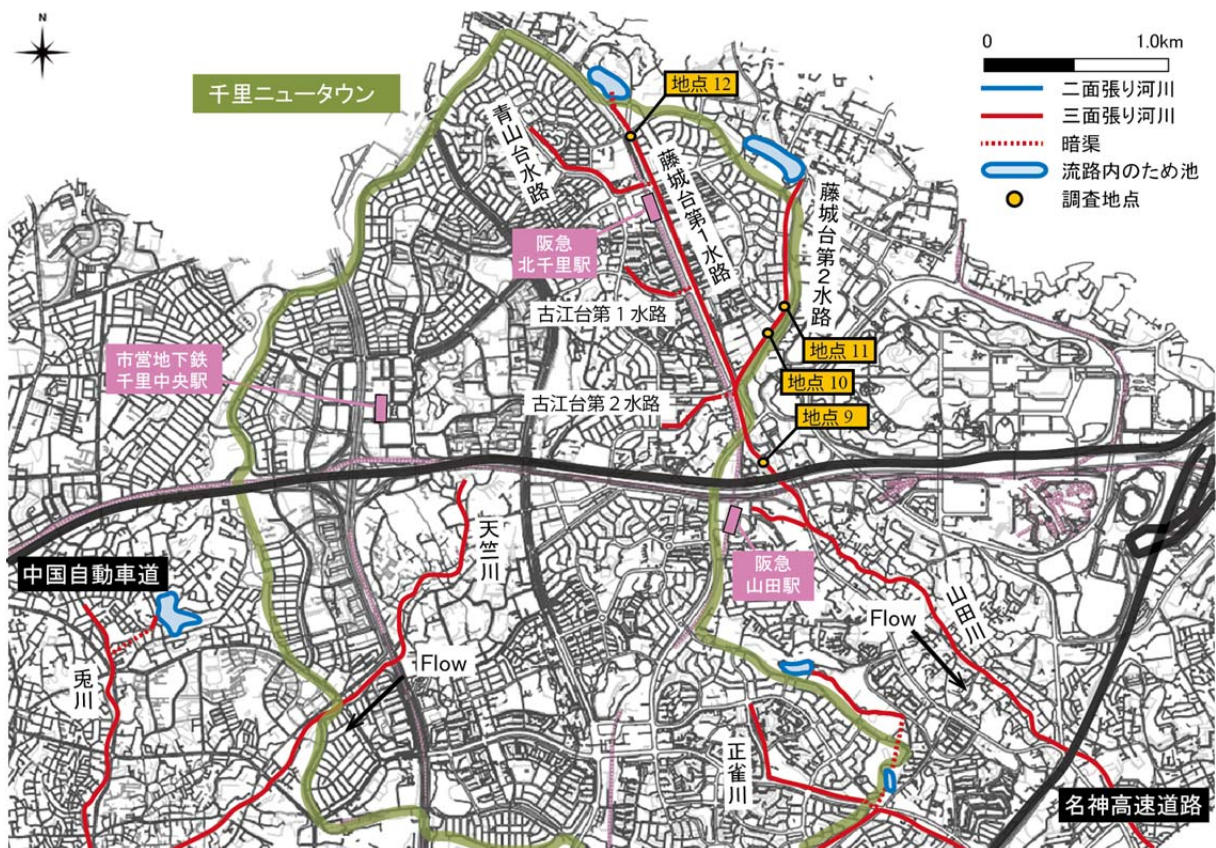


図 6.2.2 千里ニュータウン(大阪府)周辺を流れる河川と物理指標の調査地点

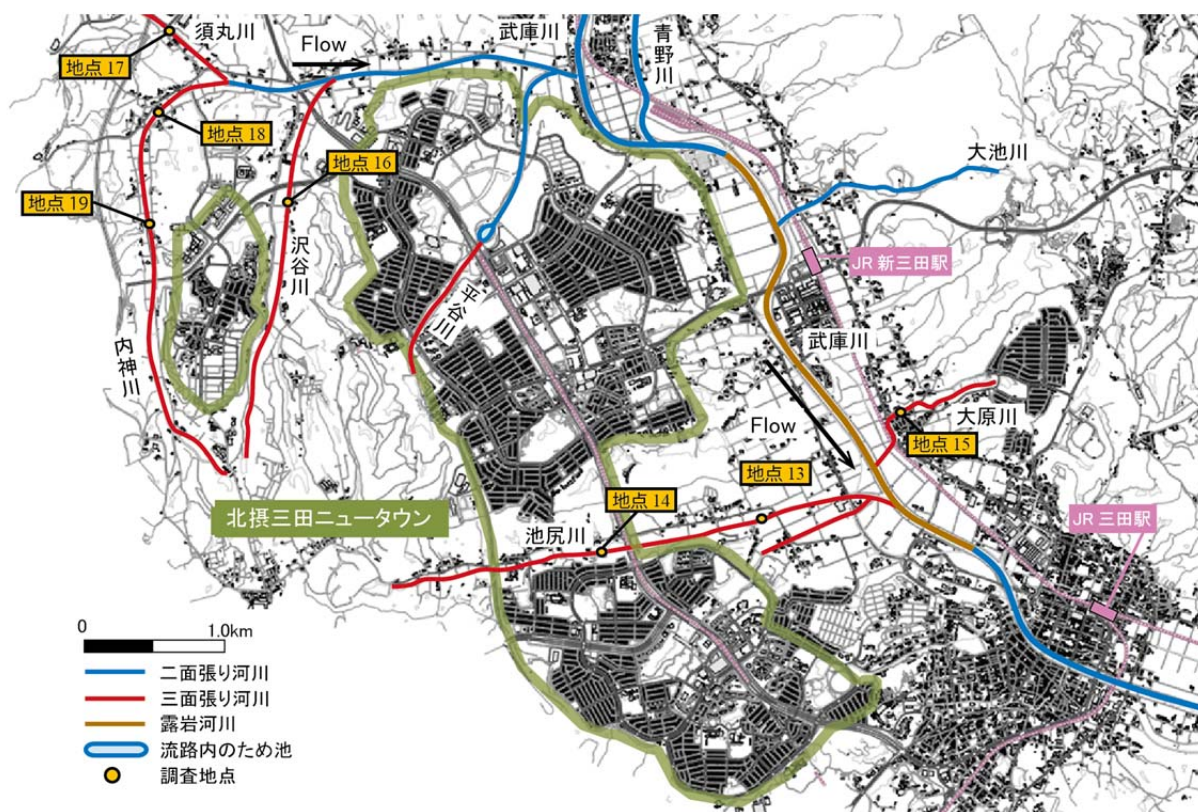


図 6.2.3 北摂三田ニュータウン(兵庫県)周辺を流れる河川と物理指標の調査地点

6.2.3. 結果と考察

(1) コンクリート三面張り河川の類型化

表 6.2.2 に類型化用の物理指標調査の結果を、図 6.2.4 にこれらの物理指標を用いた回帰木分析の結果を示す。図 6.2.4 によると、今回調査したコンクリート三面張り河川は TypeA～TypeC の 3 つに類型化されている。また、河川の類型タイプごとの植生のカバー率の違いを説明する物理指標には、河川上流端からの土砂供給条件と河床勾配が大きく影響することが示されている。

図 6.2.4 によると、Type A と分類された調査地点には、河川上流端の起点がため池ではない固定床河川が該当している。これらの河川では、増水時に上流域からある程度の土砂供給が見込まれるため、流路が直線区間であっても蛇行部であっても河道上に植生領域がある程度形成されている。ただし、図 6.2.5 に Type A に属する地点の植生のカバー率と河床勾配、および植生のカバー率と蛇行率との関係性を示すと、図 6.2.5 b) より、Type A の河川の植生のカバー率は直線区間に比べて蛇行部にて大きくなる傾向が認められる。これは、増水時の蛇行部では、直線区間に比べて河道横断方向の掃流力に偏りが生じやすく、湾曲部周辺にて土砂の堆積が促されやすいためだと考えられる。なお、今回の回帰木分析の結果（図 6.2.4）にて蛇行度の影響が検出されなかった理由は、Type A に属する地点数が少なかったためと推察される。以上の結果より、TypeA のコンクリート三面張り河川のように上流域

表 6.2.2 類型化用の物理指標の調査結果

地域	河川名	河川区分	調査点 No.	物理パラメーター					
				勾配 (°)	川幅(m)	蛇行度 θ (°)	流域面積 (km ²)	カバー率 (%)	上流端
洛西 ニュータウン	上里川	普通河川	1	0.77	2.7	0	0.41	0.0	0
			2	0.72	2.8	0	0.19	23.5	1
			3	1.05	2.8	90	0.13	70.0	1
			4	0.65	2.8	90	0.06	60.0	1
	北川	普通河川	5	0.89	2.8	0	0.98	33.8	1
			6	1.69	1.1	15.8	0.84	62.5	1
	千丈川	普通河川	7	0.69	4.8	0	1.33	0.0	0
			8	0.99	2.6	90	0.40	0.0	0
千里 ニュータウン	山田川	一級河川	9	0.72	9.7	0	3.66	0.0	0
	藤白台第2水路	水路	10	0.82	2.3	0	0.59	0.0	0
			11	0.82	2.3	30	0.56	0.0	0
	藤白台第1水路	水路	12	1.45	1.1	0	0.78	0.0	0
北摂三田 ニュータウン	池尻川	二級河川	13	0.72	5.1	0	1.90	0.0	0
			14	0.52	3.8	17.2	1.09	42.9	0
	大原川	二級河川	15	1.72	3.3	0	0.71	0.0	0
	沢谷川	二級河川	16	0.32	3.3	0	2.21	23.5	0
	須丸川	二級河川	17	0.42	2.8	0	1.82	0.0	0
	内神川	二級河川	18	0.75	4.4	101.5	2.61	46.2	0
			19	0.32	4.0	0	1.47	27.5	0

からある程度の土砂供給が見込まれる固定床河川では、直線区間と蛇行部のいずれにも河岸沿いに植生領域がある程度形成されるが、蛇行部ほど河道横断方向に流速分布が偏るため、植生領域がより広域的に形成される。この他、今回の現地調査結果によると、蛇行部の植生のカバー率はいずれの地点においても蛇行部の直上流域よりも蛇行頂点の内岸側から蛇行部の直下流域にて大きな値となる傾向が認められた(図 6.2.6～図 6.2.7)。早川ら²⁾によると、定常流れ条件の水路実験と数値解析から、固定床蛇行水路では蛇行部の水衝部付近の水面が盛り上がり流れが淀んだ状態となり、水衝部上流域にて土砂の堆積が生じやすくなることが報告されている。本調査結果は早川ら²⁾の報告とは異なる結果であるが、この要因について推察すると、増水後半のように流量が低下してくると蛇行部の水衝部付近の流れの背水状況が次第に緩和されるため、蛇行部上流側に一度堆積した土砂が蛇行部下流側へと輸送されやすくなるためと考えられる。この際、河床が移動床である場合は上流域から輸送されてくる土砂の多くが蛇行頂点の外岸側の水衝部に堆積するものと推察されるが、河床が固定床である場合、その場所の条件によっては土砂が水衝部に堆積せず、蛇行頂点の内岸側や蛇行部直下流域に堆積するのではないかと推察される。

一方、図 6.2.4 にて Type B および Type C と分類された調査地点には、河川上流端の起点がため池のみである固定床河川が該当している。これらの河川では、増水時に上流からの土砂供給が殆ど見込めないため、上述した Type A のコンクリート三面張り河川に比べて明らかに河道上の植生のカバー率が低い値を示している。さらに、図 6.2.4 によると、Type B および Type C は河床勾配の大きさによって分類され、両タイプは河床勾配 0.76° (1/60) 程度に境界が存在することが示されている。

そこで、図 6.2.8 に Type B および Type C に属する地点における植生のカバー率と河床勾配、および植生のカバー率と蛇行度との関係性を示す。図 6.2.8 a) に回帰木分析の結果を重ねると、今回の調

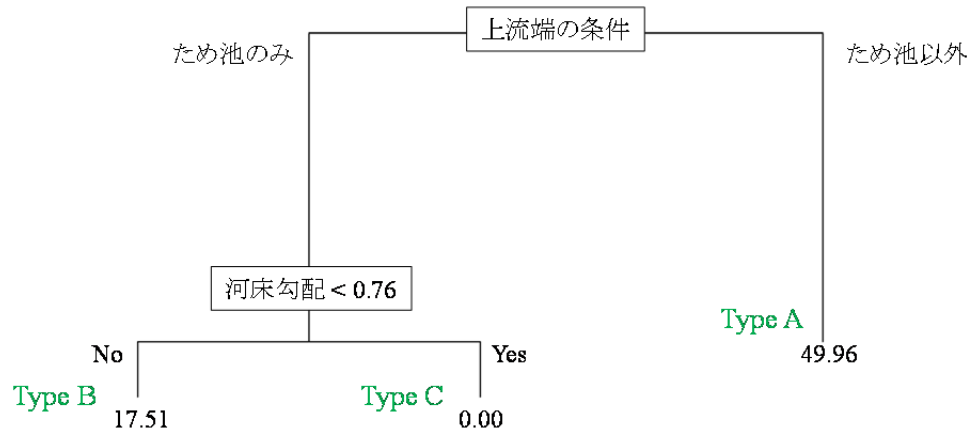


図 6.2.4 コンクリート三面張り河川の植生カバー率を説明する物理指標(回帰木分析),
樹形図の枝下の値は, 植生のカバー率の平均値を示す

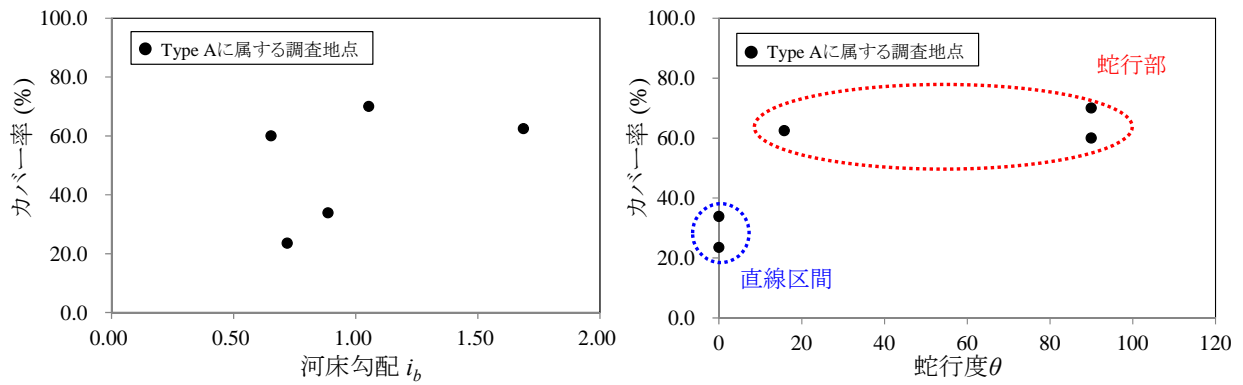


図 6.2.5 Type A のコンクリート三面張り河川における植生のカバー率と河床勾配との関係(左図),
植生のカバー率と蛇行度との関係(右図)



図 6.2.6 調査地点 No.3 における蛇行部周辺の植生繁茂の様子,
左)蛇行部の直上流域(蛇行頂点より数 m 上流側), 右)蛇行部の直下流域(蛇行頂点より数 m 下流側)



図 6.2.7 調査地点 No. 4 および No. 6 における蛇行部周辺の植生繁茂と土砂の堆積の様子、
左)調査地点 No. 4 の蛇行部(蛇行下流域より上流を望む), 右)調査地点 No. 6 の蛇行部

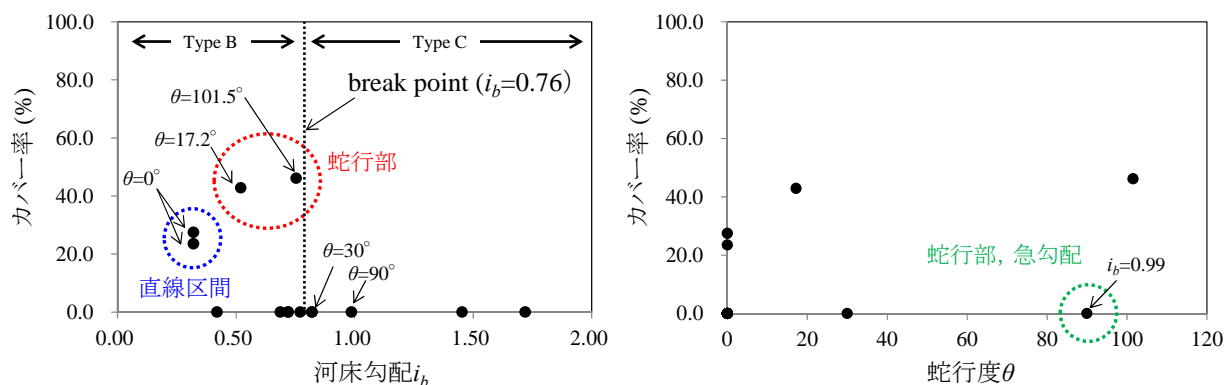


図 6.2.8 Type B と Type C のコンクリート三面張り河川における植生のカバー率と河床勾配との
関係(左図), 植生のカバー率と蛇行度との関係(右図)

査地点では、河床勾配が大きい Type C に属するコンクリート三面張り河川では、流路内に蛇行部が存在していても植生領域が殆ど形成されないことが分かる。一方、河床勾配が 0.76° 程度よりも緩やかな Type B に属するコンクリート三面張り河川では、図 6.2.8 a) の赤丸で示すように蛇行部にて明瞭な植生領域が形成されている。また、図 6.2.8 a) の青丸で示すように、河床勾配がかなり緩ければ直線区間であっても植生領域が形成されるようである。以上の結果より、Type B や Type C のように河川上流端がため池起点であり、上流域からの土砂供給が殆ど見込めない固定床河川では、河床勾配がある程度緩やかな地点のみ河岸沿いに植生が自然と繁茂することを期待できるものの、それ以外の河床勾配が大きい地点では蛇行部以外で河岸沿いに自然と植生領域が形成されることを期待できないものと推察される。また、Type C の河川のように河床勾配がさらに急になると、流路内に蛇行部を設けたところで河道内の植生のカバー率を大きく向上させるほどの効果が生じない可能性もあることが示された。

表 6.2.3 固定床河川の類型タイプ

類型 タイプ	物理指標による分類		植生領域の特徴
	上流域の条件	河床勾配 θ	
Type A	上流域からの 土砂供給がある	—	・植生領域は直線区間より蛇行部で広域的に 形成される傾向
Type B	上流からの 土砂供給が少ない	緩勾配 (0.76° 程度以下)	・植生領域は蛇行部にて形成される傾向 ・ただし、かなり緩勾配であれば、直線区間 においても植生領域が形成される可能性がある
Type C		急勾配 (0.76° 程度以上)	・直線区間と蛇行部のいずれにも植生領域が 形成されない傾向

(2) 固定床河川の環境修復技術に関する考察

表 6.2.3 に、上述した固定床河川の類型タイプの一覧と、各々の類型タイプの河川における植生領域の特徴について示す。表 6.2.3 は、固定床河川としてコンクリート三面張り河川と露岩河川を想定としており、対象地点の上流域に移動床領域が存在すれば Type A、対象地点の上流域がため池やダム湖等であり移動床領域が存在しなければ Type B あるいは Type C のいずれかに属すると定義している。

図 6.2.9 は、第 4 章の水路実験結果（上流からの流砂量の違いに応じた固定床河床への土砂の堆積状況）に固定床河川の各類型タイプの概ねの該当領域を記したものである。図 6.2.9 によると、Type A ～Type C に属する固定床河川は、いずれのタイプの河川も自然状態における上流域からの流砂量程度では時間経過と共に移動床河床に戻れないことが分かる。このため、これらの固定床河川において上流からの少ない流砂量を有効に利用した環境修復を実現するには、河道全面を移動床河床に戻すのではなく、河岸沿いにのみ土砂の堆積域や緩流域を創出して植生繁茂を促すことが現実的な方法であると考えられる（ただし、堤内地の開発が進んでおらず、社会的制約の小さい固定床河川においては、

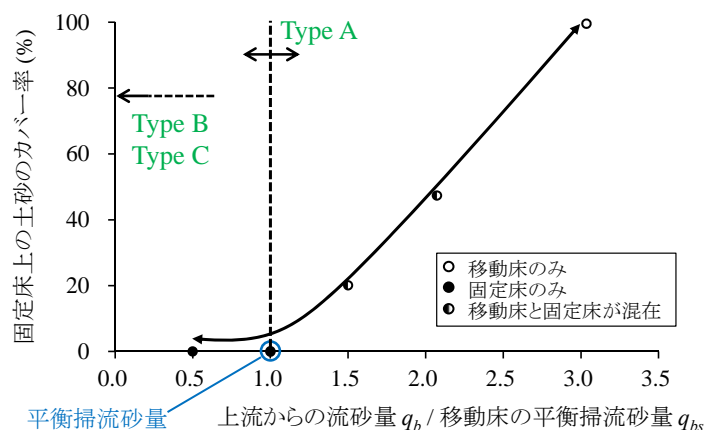


図 6.2.9 上流からの流砂量の違いに応じた固定床河床への土砂の堆積状況

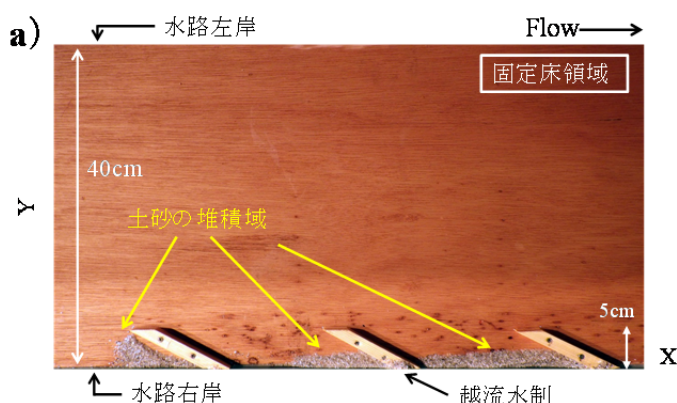


図 6.2.10 上流からの土砂供給量と固定床河床(直線区間)における土砂の被覆率との関係

川幅を拡幅することで河道内に蛇行部を創出するような方法も適すると推察される)。

そこで、ここでは第5章で検討した水制工を利用した環境修復の方法について、固定床河川の類型タイプごとに考察する。まず、上流域からの土砂供給が存在する Type A の固定床河川の場合、直線区間には、図 6.2.10 に示すような鋭角な上向き水制 ($\theta = 30^\circ$ 程度) を河岸沿いに連続的に配置することが適すると考えられる(5.3 節による検討)。上向き水制群を設置した Type A の固定床河川では、水制間に土砂が堆積することで水制周辺に流れの緩流域が形成されるなど河道内物理環境が多様化し、時間経過と共に植生の繁茂する領域が次第に広がるものと期待される。

一方、Type A の河川の蛇行部では、上述の現地調査結果より、そのままの状態でも河岸沿いに植生領域が形成されやすいことが示されている(図 6.2.5 b))。このため、Type A の河川の蛇行部では水制を施工する必要性が低く、むしろ対象地点の上下流域にも連続した植生の繁茂領域が広域的に確保されるような環境修復の計画を検討することが望ましいと考えられる。

次に、TypeB や TypeC のように固定河川の直線区間では、上流域から掃流砂が少なくとも供給される場合、鋭角な上向き水制により水制間に土砂の堆積が形成される可能性がある。しかし、ため池を起点とする多くの固定床河川では上流からの掃流砂の供給が非常に少なく、鋭角な上向き水制を設置したとしても水制間に土砂の堆積域が形成されない可能性が高い。鋭角な上向き水制は、水制直上流域において水制と側壁との間に向かう流れを形成するため(図 6.2.11)、水制間に土砂の堆積が十分に形成されない場合、直角水制に比べて水制周辺の掃流力が抑制されにくい。このため、TypeB、とくに TypeC のように急勾配で上流からの土砂供給が殆ど見込めない固定床河川では、鋭角な上向き水制ではなく、流れの緩流域を創出することを目的とした直角水制群、あるいは水制間の流れの抑制を目的とする頭部水制を有するような水制群を連続的に配置することが好ましいものと推察される。これより、上流からの土砂供給が少ない固定床河川であっても、河道内に流れの緩流域を創出することが出来れば、水制周辺に植生の繁茂する領域が次第に広がるものと期待される。実際、図 6.3.1 に示すように、第3章で検討した武庫川水系池尻川の直角水制群の周辺には水制群の設置より 4 ～ 5 年経過後、水制間への植生の定着が僅かながら確認されている。

一方、TypeB や TypeC の河川の蛇行部では、緩勾配を有する Type B の河川においてのみ、蛇行部に自然と植生領域が形成される可能性がある。しかし、市街地周辺を流れるコンクリート三面張り

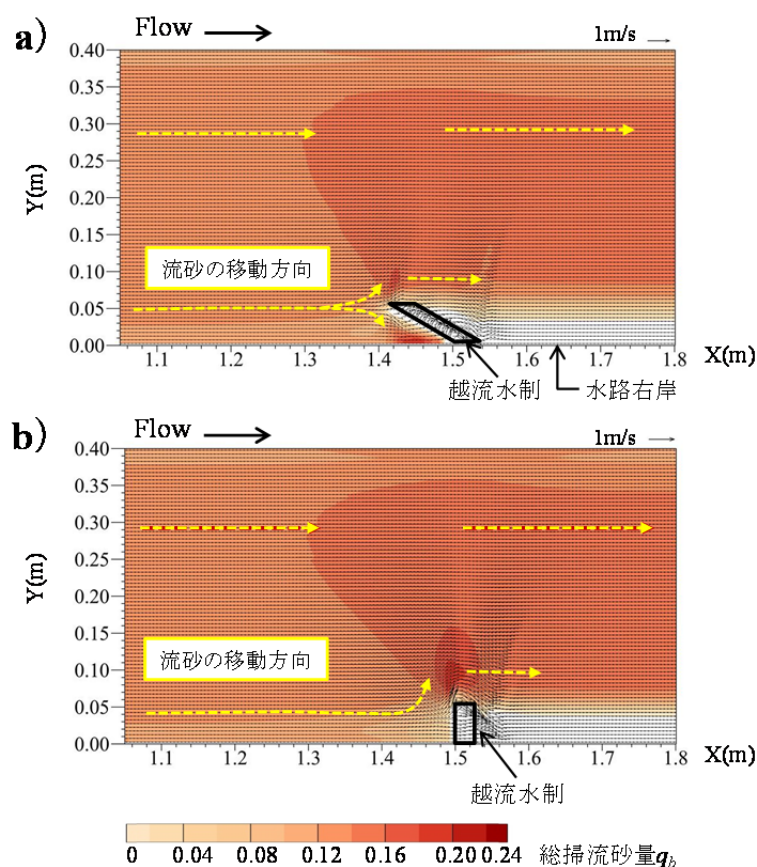


図 6.2.11 水制近傍の河床近傍流速ベクトルと計算中にその場所を通過した総掃流砂量,
a) 鋭角な上向き水制($\theta=30^\circ$), b) 直角水制($\theta=90^\circ$)

河川をはじめ、我が国の固定床河川はある程度急勾配を有することが普通である。このため、流路内に蛇行部が存在していたとしても植生領域が殆ど形成されない場合が多いものと推察される。したがって、TypeB および TypeC の河川の蛇行部には土砂の堆積を誘引するためには、水制を設置するなど、土砂の堆積を促すような整備を行うことが好ましいと考えられる。しかしながら、本検討の第5章では、固定床河川の湾曲蛇行部に設置された水制近傍の流砂・河床変動特性までを考慮しておらず、ここで TypeB や TypeC の河川の蛇行部に適する水制配置について議論することは難しい。そのため、固定床河川の蛇行部に適する水制配置については、今後改めて検討する必要がある課題として留めておく。この他、水制のような構造物によって河道内へと植生繁茂を促すことが固定床河川の水圏生態系に良好な効果を与えるものであるか否かについても、今後、経年的な調査から検証する必要がある。



図 6.3.1 池尻川の直線区間における直角水制群周辺の植生の繁茂状況，
施工より 4.5 年経過後(2013 年 10 月 2 日撮影)

6.3. 結 論

本検討では、関西地区のニュータウン地域を含む 3 つの市街地を対象とし、コンクリート三面張り河川の類型化を行うと共に、河川の類型タイプごとに適すると考えられる水制工を利用した環境修復技術について考察した。これより、次の結論を得た。

- (1) ニュータウン地域を含めた市街地周辺の河川を調べた結果、大部分の河川がコンクリート三面張り河川に改修されていることが確認できた。また、回帰分析よりコンクリート三面張り河川を類型化した結果、固定床河川は物理環境から次の 3 つのタイプ (Type A~Type C) に分類された。
- (2) Type A には上流からの土砂供給を有する固定床河川が該当した。Type A の河川では、河床勾配や蛇行部の有無に関係なく河道内にある程度の植生領域が形成されていた。ただし、植生のカバー率と蛇行度との関係を比較すると、植生は直線区間に比べて蛇行部ほど広域的に形成される傾向が認められた。一方、Type B および Type C には、河川上流端がため池起点で、上流からの土砂供給の少ない河川が該当した。Type B に属する河川は、Type C に属する河川よりも緩勾配であり、蛇行部にはある程度の植生繁茂が認められた。一方、Type C に属する河川は、上流からの土砂供給があまり見込めないうえに河床勾配が急勾配 (1/60 程度以上) であり、直線区間および蛇行部のいずれにおいても植生繁茂が殆ど認められなかった。
- (3) 固定床河川の類型タイプごとに適する環境修復の手法について、第 4 章および第 5 章の結論を踏まえて考察した。Type A の河川の直線区間には、鋭角な上向き水制を連続的に配置することで水制間に土砂を堆積させ、植生繁茂を促す方法が適するものと推察された。一方、Type B や Type C のように上流からの土砂供給が少ない固定河川の場合は、鋭角な上向き水制

を設置したとしても水制間に土砂の堆積が促されない可能性が高い。このため、鋭角な上向き水制ではなく、流れの緩流域を創出することを目的とした直角水制を連続的に配置することが好ましいものと推察された。

なお、本検討は関西地区に分布する3つの市街地においてコンクリート三面張り河川の物理指標を調査し、河川の類型化を試みたものであり、各河川の河床勾配や蛇行度の違いが河道内の植生のカバー率へ与える影響に関する物理的意味までを評価したものではない。この点に関しては水路実験や数値解析より今後更に詳細に検討することが必要だと考えられる。

参考文献

- 1) 金澤康史・三宅洋: コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, 応用生態工学会誌, 9(2), pp.141-150, 2006.
- 2) 早川博・宮本大・夏井皓盛: 屈曲蛇行する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究, 水工学論文集, 55, pp.781-786, 2011.

第7章 結論と展望

研究成果の総括

市街地や農村地域を流れる中小河川は人々にとって身近な河川であり、良好な景観や生態系の再生が求められる河川である。市街地や農村地域を流れる多くの中流河川では、流下能力向上のためにコンクリートで河道を被覆されたコンクリート三面張り河川、あるいは上流からの土砂供給量が少ないために河床の基岩が露出し、河床から十分な土砂の堆積層が失われた領域が全国各地に存在する。このような土砂の堆積が不十分な河川では、河道内物理環境の単調化や河床の粗度が小さくなるに伴う流れの高速化により、限られた種類のみが高密度で生息する単純な水圏生態系が形成されることが指摘されている。しかしながら、このような移動床と固定床とが混在する場を対象とした流砂・河床変動特性に関する既存報告や環境修復技術に関する知見、さらには水生動物群集の生息状況に関する既存報告等は非常に限られており、研究開始時において固定床河川を対象とした環境修復の具体的な対策を模索することは難しい状況にあった。

このような背景のもと、本論文では、河床から土砂の堆積層が失われた固定床領域を有する中小河川を対象とし、土砂水理学に基づいた固定床河川の環境修復技術に関する基礎的な知見を得ることを目的に、河川生態学と土砂水理学の融合研究として第3章～第6章の検討を実施した。各章で得られた成果を以下に示す。

第1章では、固定床領域を有する中小河川について、河道内物理環境の単調化に伴う水圏生態系の劣化が懸念視されること、および固定床河川の環境修復に関する考え方や技術が現時点で殆ど確立されていないことを我が国の河川管理（整備）の歴史の変遷を交えながら述べた。同時に、固定床領域を有する場の流砂・河床変動特性に関する土砂水理学的検討と、環境修復にまつわる生態学的検討に関する従来の研究と取組について概説した。これより本章では、固定床領域を有する河川において環境修復を実現するにあたって解決すべき課題を3つ提示し、本論文の目的を示した。

第2章では、国内の中小河川の固定床化に関する現況を概説すると共に、従来の研究のレビューとして、固定床河川の環境修復に関する生態学的知見と土砂水理学的知見、固定床領域を有する場の流砂・河床変動特性に関する土砂水理学的知見と平面2次元河床変動解析、および環境修復技術の一つとして近年注目される水制に関する土砂水理学的知見について順に整理した。これらのレビューにより、現状にて固定床河川の環境修復に関する設計基準はほぼ存在しないこと、および固定床領域を有する河川における環境修復の取り組みは個別の河川を対象に行われたものが大半であり、固定床河川が有する流況特性や流砂・河床変動特性にまで踏み込んだ検討は殆ど行われていないことを示した。また、固定床領域を有する場における土砂水理学的知見に関して、固定床領域の流砂・河床変動特性に関する既存報告の内容を概説すると共に、固定床領域の流砂・河床変動を扱うための平面2次元河床変動解析のモデルについて概説した。これより、本論文で対象とするような固定床と移動床の混在する流れ場を対象とした流砂・河床変動特性に関する報告は限られていること、

および数値解析法にも固定床領域全面が移動床河床に戻る際に必要とされる土砂量の評価部分に一部課題が存在する可能性を述べた。さらに、環境修復技術として近年注目される水制については、固定床領域に設置された水制に関する既存報告は流れのみを扱ったものが大半を占め、固定床上の水制まわりの流砂・河床変動特性を把握した報告は殆ど存在しないことを示した。

第3章では、固定床河川の一つとしてコンクリート三面張り河川（二級河川武庫川水系池尻川）を対象とし、底生動物群集の生息状況の把握および環境修復を行うにあたっての目標設定、小規模水制群を用いた底生動物群集の生息環境修復の試み、およびモニタリング調査による環境修復効果の確認と課題の把握までを実施した。ただし、池尻川に設置された小規模水制群は、研究開始時点において固定床河川の環境修復に適する水制群の配置に関する知見が殆ど存在しなかったため、移動床河川に対する水制群の設計指針を参考にその配置が決定されている。これらの検討より、今回調査した固定床河川では河岸沿いの植生の被覆率が川幅の10%を上回るあたりから底生動物の分類群数が改善すること、移動床河川に関する水制の設計指針や既存知見は固定床河川の環境修復にそのまま適応できない可能性（水制群の間には土砂が殆ど堆積せず、底生動物群集の生息状況の改善効果が低かった）を示した。そこで、次の第4章と第5章の検討では、第6章の検討（固定床河川の類型タイプごとに適切な環境修復法を提案）に必要である固定床を有する場の流砂・河床変動特性について、移動床のみの場と比較しながら検討した。

第4章では、流路内に固定床が露出する場を対象とし、河道全面に土砂が再び堆積するまでの流砂・河床変動特性を把握することを目的に、以下の2つの検討を行った。一つ目の検討では、同一水理条件のもと、移動床水路と固定床水路を流れる流砂の伝播速度の違いを比較検討した。これより、固定床水路では移動床水路に比べて流砂の伝播速度が非常に速くなること、さらに固定床水路の場合のみ、給砂の総量が同じであっても土砂の与え方（少しずつ与えるか、一度に与えるか）に応じて流砂の伝播速度がかなり変化することを示した。

二つ目の検討では、水路実験と数値解析から固定床領域を有する場に与える給砂量を変化させ、再び土砂が堆積して移動床河床に戻るまでの流砂・河床変動特性を検討した。まず水路実験より、上流からの土砂供給量の減少に伴い固定床が一度広域的に露出したような場では、その後上流から与える土砂供給量を元の移動床河床の平衡掃流砂量程度まで増やしたところで、固定床上に土砂が堆積せず移動床河床へと戻らない「動的平衡河床の不可逆性」が存在することを示した。次いで、固定床を有する場の流砂・河床変動特性、および固定床の流し得る最大の掃流砂量である堆積限界掃流砂量を考慮した平面2次元河床変動解析を構築し、水路実験にて確認された動的平衡河床の不可逆性のある程度再現できることを確認した。

第5章では、固定床全面に土砂を堆積させるのではなく、河岸沿いにのみ植生繁茂を促すための土砂の堆積域を創出することを目的とし、水制近傍の流砂・河床変動特性について以下の2つの検討を行った。一つ目の検討では、水路実験と数値解析から移動床と固定床に設置された直角水制近傍の流砂・河床変動特性を比較した。水路実験の結果、移動床の水制近傍には局所洗掘が形成され

ると共にその洗掘孔から pickup された砂礫が水制下流域に堆積すること、その一方で固定床の水制近傍には土砂の堆積が全く生じないことを確認した。これは、平面2次元河床変動解析から水制近傍の流れ・流砂の輸送を再現した結果、固定床上の水制先端部には砂礫を水制下流域へと輸送するように働く無次元限界掃流力以上の流れが形成されるものの、固定床河床では水制近傍に局所洗掘が生じないため、水制上流域側に限界掃流力以下の流れの緩流域が広く形成され、上流から供給される流砂が水制近傍まで到達する前に水制対岸方向へと流向を変えてしまうからである。このように本検討では、固定床上の直角水制は移動床上の直角水制と異なり、水制下流域に土砂の堆積を促す効果が弱いこととその要因を示した。

次いで、二つ目の検討では、固定床河川の河岸沿いにのみ土砂を堆積させ得る水制配置を明らかにするため、水制角度に注目した。水路実験の結果、固定床上の水制は鋭角に上流向きに設置（水路壁面から 30° 回転）した越流状態の水制のみ、水制群の間に土砂の堆積域を明瞭に創出する機能を有することが認められた。これは、数値解析から水制近傍の流れ構造を検討した結果、鋭角な上向きの越流水制の場合のみ水制上流域側の流れが2方向に分岐し（主流側に向かう流れと、水制と壁面との間に向かう流れ）、後者の流れが固定床上の水制近傍まで土砂を輸送する役割を果たすためである。その一方で、数値解析から固定床上の異なる角度の非越流水制近傍の流れ構造を検討した結果、非越流水制は越流水制と異なり、鋭角に上向きに設置したものほど水制近傍まで土砂を到達させないように働くことが認められた。これは、非越流水制の場合、上向きに設置した水制ほど水制上流側の堰あげ背水領域が広範囲に形成され、上流から流れてくる流砂が対岸側へと輸送されやすいためである。

第6章では、関西地域の3つの市街地（千里ニュータウン、洛西ニュータウン、北摂三田ニュータウン）を流れるコンクリート三面張り河川を対象とし、これらの河川を水生動物群集の生息に重要であると考えられる河道内物理環境から類型化した。具体的には、河道内の植生や土砂の被覆率に影響を与える河道内物理環境として、勾配、川幅、流域面積、蛇行度、上流からの土砂の供給条件の現地調査結果を用い、線形回帰分析の一つである回帰木分析（regression tree analysis）より固定床河川を3つに類型化した。その後、コンクリート三面張り河川の類型タイプに露岩河川を含め、第3章～第5章までの成果を参考に固定床河川の類型タイプごとに適する環境修復の方法について提案した

第7章では、結論として研究全体の成果を総括し、とりまとめを行った。

このように、本研究では固定床領域の露出した流れ場として市街地や農村地域を流れるコンクリート三面張り河川および露岩河川に注目し、生態学的検討と土砂水理学的検討の両方向から環境修復に向けた検討を実施した。これより、移動床領域と固定床領域では流砂・河床変動が異なることを示すことで、移動床河川に関する既存の知見や環境修復技術を固定床河川にそのまま適応できないことを確認した。そこで、固定床河川の環境修復技術として、上流から少ないながらも掃流砂の供給が存在する河川では、水制高の低い、鋭角な上流向き水制群を側壁沿いに連続的に設置するこ

とで固定床河川の側壁沿いに土砂の堆積域および植生の繁茂する領域を創出し得る可能性を示した。今後はこれらの研究を発展させ、河川の環境修復に必要な物理パラメーター、あるいは河川生物の生息状況と河道内物理環境との関係性を明らかにすることを目的に、土砂水理学的アプローチと生態学的アプローチを融合させた研究に取り組む所存である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始懇切なご指導を賜りますとともに、貴重な研究機会と研究環境を与えて下さった京都大学防災研究所 藤田正治教授に深甚の謝意を表します。そして、京都大学防災研究所 竹林洋史准教授には、研究の進め方、土砂水理学や数値計算の考え方、論文執筆・投稿に至るまで、直接的なご指導を5年半にわたり頂きました。先生方には、著者が異なる研究科から博士後期課程の学生として編入することを快く受け入れて頂き、心から感謝しております。博士後期課程の4年半と、研究室所属以前の1年間の計5年半の間、河川の流れや流砂特性、河道内物理環境の形成機構などについて学ぶ貴重な時間を得ることが出来ました。ここに謹んで感謝の意を表します。

副指導教官である京都大学防災研究所 中川 一教授と京都大学防災研究所 角 哲也教授の御両名には、定期的に研究の進捗状況や内容についてのご指導を賜りますと共に、学位論文の草稿時においても貴重なご意見・ご指導を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。京都大学防災研究所 堤 大三准教授、京都大学防災研究所 宮田秀介助教には、研究室内のゼミ発表や普段の研究生活の中で貴重なご指導を賜りますと共に、研究姿勢についても学ばせて頂きました。また、著者にとって、京都大学大学院農学研究科 中谷加奈助教が主体となり、京都大学大学院農学研究科 水山高久教授、立命館大学理工学部 里深好文教授、京都府立大学農学研究科 高濱淳一郎准教授、京都大学防災研究所 藤田正治教授らのご厚意で開講されていた流砂勉強会は、博士後期課程入学後、土砂水理学の基礎を学ぶうえで非常に参考になるものでした。株式会社 ニュージェック技師長 江頭進治先生にも、学会や京都大学防災研究所研究発表講演会等の機会において有意義なご意見を頂きました。先生方に、ここに謹んで感謝の意を表します。

本研究では、武庫川流域池尻川へと水制施工を行う段階において、武庫川上流域ルネッサンス懇談会の皆様と、懇談会を主催する兵庫県宝塚土木事務所（(旧)三田土木事務所）の大田氏、西田氏、に大変お世話になりました。大田氏、西田氏には、池尻川への水制施工の許可に関する便宜を図っていただきました。ルネッサンス懇談会の皆様方には、コンクリート三面張り河川での土木施工に関する貴重な技術的指導を頂きました。とくに、人と自然の会の木村氏には、コンクリートの練り方から施工まで貴重な技術を教えていただきました。株式会社 一成 の木下社長、渡部専務、大山氏、山田氏には、施工協力のみでなく、地元住民の方々への連絡などのパイプ役をして頂きました。兵庫県立大学自然環境科学研究所（兵庫県立人と自然の博物館主任研究員）の三橋弘宗講師には、著者をルネッサンス懇談会の委員として推薦して頂いたのみでなく、小規模な水辺環境の再生を目指す任意団体・水辺のフィールドミュージアム研究会を共に立ち上げる機会を下さり、運営や予算獲得、現場経験など貴重な知識と経験を与えて下さいました。同じく、著者と共に水辺のフィールドミュージアム研究会を立ち上げ、活動の一つとして池尻川への水制施工に伴うホタルの再生に取り組んできた独立行政法人農業環境技術研究所 大澤剛士氏、摂南大学理工学部生命科学科 石田裕子講師、摂津市立第二中学校 佐々木宏展講師、株式会社浅沼組 清水洋平氏、兵庫県立大学環境人間学部 片野泉准教授を始めとする皆様方にも大変お世話になりました。皆様のおかげで、著者の地元である兵庫県三田市内の自然再生に携わる機会を得て池尻川で土木作業を行うこと、およびそれ

を博士後期課程の研究テーマへとつなげることが出来ました。ここに謹んでお礼申し上げます。

研究室の学生の皆様には、研究を遂行する中で水路実験や現地調査などを手伝って頂くのみでなく、普段の学生生活においても沢山お世話になりました。とくに小林尚弘氏と山野井一輝氏には水路実験や現地調査を何度も助けていただきました。また、同じ博士後期課程の学生として、Jazaul Ikhsan 氏、泉山寛明氏、Harsant Puji 氏、Aly El-Dien Ahmed 氏、陳 振宇氏とは研究室内で過ごす時間が長く、研究方法や考え方、学位審査までの道程など、色々と刺激を受けました。心より感謝いたします。キャンパスであった宇治川オープンラボラトリーは人が少なく、著者以外には女性の学生が居りませんでした。上述の皆様、そして鈴木祐一郎氏、大塩清太郎氏、佐本義昭氏、玉置哲也氏、Nguyen Manh Minh Toan 氏、上戸亮介氏、長野 快氏、一貫田 悟氏、村重慧輝氏、梶原哲郎氏、坂野アイカ氏、堤博紀氏のおかげで、有意義な時間をたくさん過ごすことができました。また、事務の天野純子氏、田中佳代氏には、様々な事務手続に関して大変お世話になりました。技官の吉田義則氏、株式会社上田メカニク研究所の上田幸伸氏には、実験水路や実験機器の使い方について多くの助言を頂きました。皆様方に心よりお礼申し上げます。

最後になりましたが、本研究は JSPS 特別研究員奨励費 236529 (Representative: Tomoko Kyuka), 科研費基盤研究 B (Representative: Yasuhiro Takemon), 科研費若手研究 B (Representative: Hiroshi Takebayashi) の助成を受けたものです。また、コンクリート三面張り河川池尻川における水制施工は、任意団体・水辺のフィールドミュージアム研究会が花王・コミュニティミュージアム・プログラム 2007 (Representative: Tomoko Kyuka) および花王・コミュニティミュージアム・プログラム 2008 (Representative: Tomoko Kyuka) の助成を受けたものです。ここに謹んで感謝の意を表します。